

Διπλωματική Εργασία

**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΥΡΗΝΑ Η/Υ ΣΕ  
ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

υπό

**ΦΙΛΟΚΩΣΤΑ ΧΡΗΣΤΟΥ  
ΕΠΙΣΚΟΠΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ**

Επιβλέπων Καθηγητής: ΔΡ. ΕΡΡΙΚΟΣ ΣΤΑΠΟΥΝΤΖΗΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης "Σύγχρονες Μέθοδοι Σχεδιασμού & Ανάλυσης στη Βιομηχανία"

**ΒΟΛΟΣ 2018**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

© Φιλοκώστας Χρήστος  
Επισκόπου Παναγιώτης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ.202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Χαραλάμπους

Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πάνω απ' όλα οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μας εργασίας, κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την ιδιαίτερη τιμή που μας έκανε να αναλάβει την ευθύνη επίβλεψης της παρούσης, για το πνεύμα αλληλεγγύης, συνεργασίας και πραγματικής κατανόησης που επέδειξε καθώς και τη μεγάλη πίστη του προς το πρόσωπό μας προκειμένου να φέρουμε σε πέρας αυτό το πολύ δύσκολο κι απαιτητικό έργο. Επίσης, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές κκ. Γεώργιο Χαραλάμπους και Νικόλαο Πελεκάση για το ενδιαφέρον που επέδειξαν κατά τη προσεκτική ανάγνωση της εργασίας και για τις πολύτιμες συμβουλές κι υποδείξεις τους. Επιπλέον, ευχαριστούμε θερμά τους συναδέλφους μας, κκ. Μπουλαμάτση Αχιλλέα και Τσαντούκλα Νικόλαο για τη σημαντική βοήθειά τους στην επεξεργασία των δεδομένων των πειραμάτων και στην επίλυση των αποριών εκ μέρους των. Επιπρόσθετα, νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας χωρίς των οποίων τη κατανόηση, ολόψυχη στήριξη και καθημερινή προτροπή, ιδιαίτερα κατά το τελευταίο διάστημα των προσπαθειών μας, θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η διπλωματική μας εργασία. Τέλος, κι οι δύο νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε ο ένας τον άλλον για την άριστη ομαδικότητα, συνέπεια, μελέτη κι ενδιαφέρον που αφιερώσαμε στη συγκεκριμένη εργασία παρά το βεβαρημένο πρόγραμμά μας. Η παρούσα αφιερώνεται στη μεγάλη φιλία μας.

Φιλοκώστας Χρήστος  
Επισκόπου Παναγιώτης

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναλυτική μελέτη της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς που παρουσιάζει ο επεξεργαστής ενός φορητού Η/Υ κατά την επαναλαμβανόμενη φόρτιση κι αποφόρτισή του, κυρίως ανάλογα με τον όγκο δεδομένων που δέχεται και τον προσανατολισμό του αγωγού (*heat pipe*) που χρησιμοποιεί για την απαγωγή της θερμότητας. Ένα χάλκινο κυλινδρικό δοκίμιο προσομοιώνει τον πυρήνα του επεξεργαστή το οποίο είναι τοποθετημένο μαζί μ' έναν αγωγό θερμότητας κι έναν ανεμιστήρα σε κατάλληλη πειραματική διάταξη. Τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν αφορούν κάθε φορά διαφορετική τιμή εισόδου στο σύστημα, μεταβλητό χρόνο διέγερσης του και διαφορετική διεύθυνση του *heat pipe* ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το εκάστοτε διαφορετικό θερμικό φορτίο του πυρήνα αντιπροσωπεύει το *soldering iron* το οποίο είναι εμφυτευμένο μέσα στο δοκίμιο, ένας αυτοσχέδιος διακόπτης συνδράμει στον έλεγχο των χρονικών στιγμών θέρμανσης και ψύξης του δοκιμίου ενώ η όλη πειραματική διάταξη τοποθετείται οριζόντια ή κατακόρυφα για τη μελέτη της επίδρασης της βαρύτητας στη ψυκτική απόδοση του συστήματος. Δεδομένα λήφθηκαν τόσο για τη θερμοκρασία του πυρήνα μέχρι τη κατάσταση θερμικής ισορροπίας όσο και κατά την συνεχόμενη διέγερσή του σε διάφορες συχνότητες. Η εξαγωγή κι επεξεργασία των τελικών τιμών έλαβε χώρα σε ειδικά υπολογιστικά και λογισμικά προγράμματα. Η ανάγνωση της παρούσης εμπεριέχει ορισμένες βασικές έννοιες της Θερμοδυναμικής, της λειτουργίας των αγωγών θερμότητας κι αρχές συμπεριφοράς των συστημάτων 1<sup>ης</sup> τάξεως κατά τη διέγερσή τους. Αναφορικά με το τελευταίο, ερευνάται η σχέση μεταξύ της απόκρισης της θερμοκρασίας του πυρήνα και των συστημάτων αυτών όταν ο επεξεργαστής δέχεται διαφορετικό πλήθος δεδομένων κάθε φορά. Η προσοχή εφίσταται κυρίως στον υπολογισμό του πλάτους και της διαφοράς φάσης των σημάτων θερμοκρασίας και ισχύος εισόδου στον πυρήνα, η μελέτη κι η λεπτομερής ανάλυση των οποίων οδηγεί στην εξαγωγή χρήσιμων και σημαντικών συμπερασμάτων για τη παρούσα εργασία και για περεταίρω έρευνα.

## Abstract

**This diploma thesis analyzes the temperature behavior of the processor of a portable PC during its repeated loading and unloading, mainly according to the volume of data it receives and the orientation of the heat pipe it uses for the heat dissipation . A copper cylindrical specimen simulates the core of the processor which is placed together with a heat conductor and a fan in a suitable experimental arrangement. The experiments that have been carried out concern each time a different input value in the system, its variable excitation time and the different direction of the heat pipe relative to the horizontal plane. The different heat load of the core is represented by the *soldering iron* which is implanted in the specimen, an improvised switch assists in controlling the heating and cooling times of the specimen while the whole experimental device is positioned horizontally or vertically to study the effect of gravity on cooling performance of the system. Data was obtained for both the core temperature reaching the thermal equilibrium state as well as its continuous excitation at various frequencies. The export and processing of the final values took place in special computer and software programs. The present reading contains some basic concepts of Thermodynamics, the operation of heat pipes and behavioral principles of first order systems upon their stimulation. In the latter, the relationship between the response of the core temperature and 1<sup>st</sup> order systems is investigated when the processor receives a different set of data at a time. Attention is drawn mainly to the calculation of the amplitude and phase difference of the core temperature and input signals, the study of which, in detail, leads to the drawing of useful and meaningful conclusions for the present study and for further research.**

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....</b>	<b>9</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>12</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Αρχές Θερμοδυναμικής.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Εσωτερική ενέργεια, θερμότητα κι ειδική θερμοχωρητικότητα.....	15
2.1.2 Διεργασία και καμπύλη αλλαγής φάσης νερού.....	16
<b>2.2 Μετάδοση Θερμότητας.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή.....	19
2.2.1.1 Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας κι εξίσωση θερμικής διάχυσης.....	21
2.2.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.....	23
2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....	26
<b>2.3 Γραμμικά Συστήματα.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Γραμμικά συστήματα 1 <sup>ης</sup> τάξεως.....	30
2.3.2 Απόκριση συστημάτων 1 <sup>ης</sup> τάξεως σε βηματική είσοδο.....	31
2.3.3 Απόκριση συστημάτων 1 <sup>ης</sup> τάξεως σε ημιτονοειδή είσοδο.....	34
<b>2.4 Αγωγοί Θερμότητας (<i>Heat Pipes</i>).....</b>	<b>37</b>
2.4.1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά των <i>Heat Pipes</i> .....	37
2.4.2 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των <i>Heat Pipes</i> .....	41

2.4.3	Μαθηματικοί τύποι, μοντέλα και περιορισμοί.....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....53</b>		
3.1	Σχεδίαση του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	53
3.2	Κατασκευή του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	54
3.3	Όργανα Μετρήσεων.....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....64</b>		
4.1	Αρχικοποίηση Μεταβλητών και Διαδικασία Λήψης Μετρήσεων.....	64
4.2	Υπολογισμός του Χρόνου Διάχυσης.....	71
4.3	Μελέτη της Απόκρισης της Θερμοκρασίας του Πυρήνα.....	73
4.4	Ψυκτική Απόδοση του <i>Heat Pipe</i> Ανάλογα με τον Προσανατολισμό.....	88
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ &amp; ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....89</b>		
5.1	Υπολογισμός του Χρόνου Διάχυσης.....	93
5.2	Μελέτη της Απόκρισης της Θερμοκρασίας του Πυρήνα.....	95
5.3	Ψυκτική Απόδοση του <i>Heat Pipe</i> Ανάλογα με τον Προσανατολισμό.....	131
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....136</b>		
6.1	Συμπεράσματα.....	136
6.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	137
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>139</b>



## Πίνακας Συμβόλων

U: Εσωτερική ενέργεια [J]

u: Ειδική εσωτερική ενέργεια [  $\frac{J}{Kg}$  ]

Θ: Θερμοκρασία [ $^{\circ}C$ ]

$\dot{Q}$  : Ροή θερμότητας [W]

q: Ειδική θερμότητα [  $\frac{J}{Kg}$  ]

$C_{υλικού}$ : Ειδική θερμοχωρητικότητα υλικού [  $\frac{J}{Kg*K}$  ]

$C_p$ : Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [  $\frac{J}{Kg*K}$  ]

$C_v$ : Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο [  $\frac{J}{Kg*K}$  ]

$T_{sat}$ : Θερμοκρασία κορεσμού [ $^{\circ}C$ ]

$P_{sat}$ : Πίεση κορεσμού [mmHg ή atm]

WHL: Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού [  $\frac{KJ}{Kg}$  ]

x: Απόσταση [m]

A: Εμβαδό επιφάνειας [ $m^2$ ]

λ: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [  $\frac{W}{m*K}$  ή  $\frac{kcal}{m*h*C}$  ]

ρ: Πυκνότητα [  $\frac{Kg}{m^3}$  ]

$\alpha$ : Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας [  $\frac{m^2}{sec}$  ]

$h$ : Συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας [  $\frac{W}{m^2 * K}$  ]

$T_s$ : Θερμοκρασία επιφάνειας στερεού κατά τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή [K]

$T_\infty$ : Θερμοκρασία μακριά από την επιφάνεια [K]

$\sigma$ : Σταθερά *Stefan-Boltzmann* [  $\frac{W}{m^2 * K^4}$  ]

$\epsilon$ : Ικανότητα εκπομπής επιφάνειας

$\alpha$ : Ικανότητα απορρόφησης επιφάνειας

$x(t)$ : Είσοδος σε σύστημα στο πεδίο των χρόνων

$y(t)$ : Έξοδος από σύστημα στο πεδίο των χρόνων

$\tau$ : Χρονική σταθερά συστήματος [sec]

$\omega$ : Γωνιακή συχνότητα σήματος [  $\frac{rad}{sec}$  ]

$\Phi$ : Φάση σήματος [° ή rad]

$\Delta P$ : Διαφορά πίεσης [atm]

$L_{eff}$ : Δραστικό μήκος του *heat pipe* [m]

$A_w$ : Επιφάνεια του φιλιλίου σε τομή κάθετα στο διαμήκη άξονα του *heat pipe* [  $m^2$  ]

$\sigma$ : Επιφανειακή τάση [  $\frac{N}{m^2}$  ]

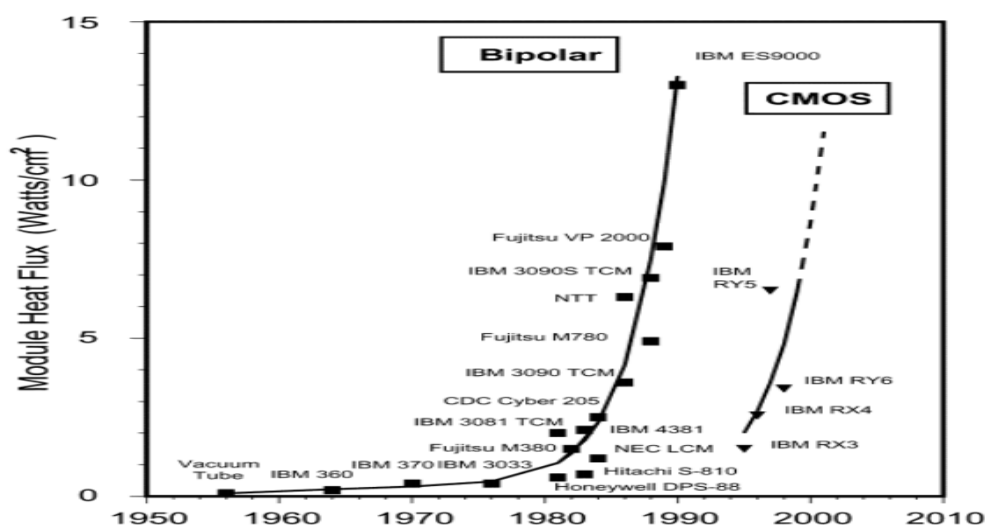


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, οι υπολογιστές εισέβαλαν στην ζωή μας δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για την δόμηση μιας νέας κοινωνίας στην οποία η καθημερινή ζωή θα είναι ευκολότερη για κάθε άνθρωπο. Η ανάπτυξή τους έχει επιφέρει τεράστια πρόοδο σε ένα ευρύ τεχνολογικό κι επιστημονικό φάσμα, από την υγεία, τη βιομηχανία κ.α. μέχρι ακόμη τη προσωπική διασκέδαση κι άνεση, βοηθώντας αποτελεσματικά στη μείωση του χρόνου, του κόστους και του μόχθου. Η εσωτερική αρχιτεκτονική δομή των ηλεκτρονικών υπολογιστών πέραν των άλλων διατάξεων και συστημάτων, αποτελείται κι από ένα μεγάλο πλήθος αντιστάσεων. Επομένως, προκειμένου αυτοί να επιτελέσουν όλες τις εφαρμογές που τους έχουν ανατεθεί, πρέπει να τροφοδοτούνται συνεχώς από ηλεκτρική ισχύ με αποτέλεσμα να διεγείρονται οι αντιστάσεις αυτές και να θερμαίνονται, συσσωρεύοντας στο εσωτερικό τους μεγάλα ποσά ενέργειας (θερμότητας).

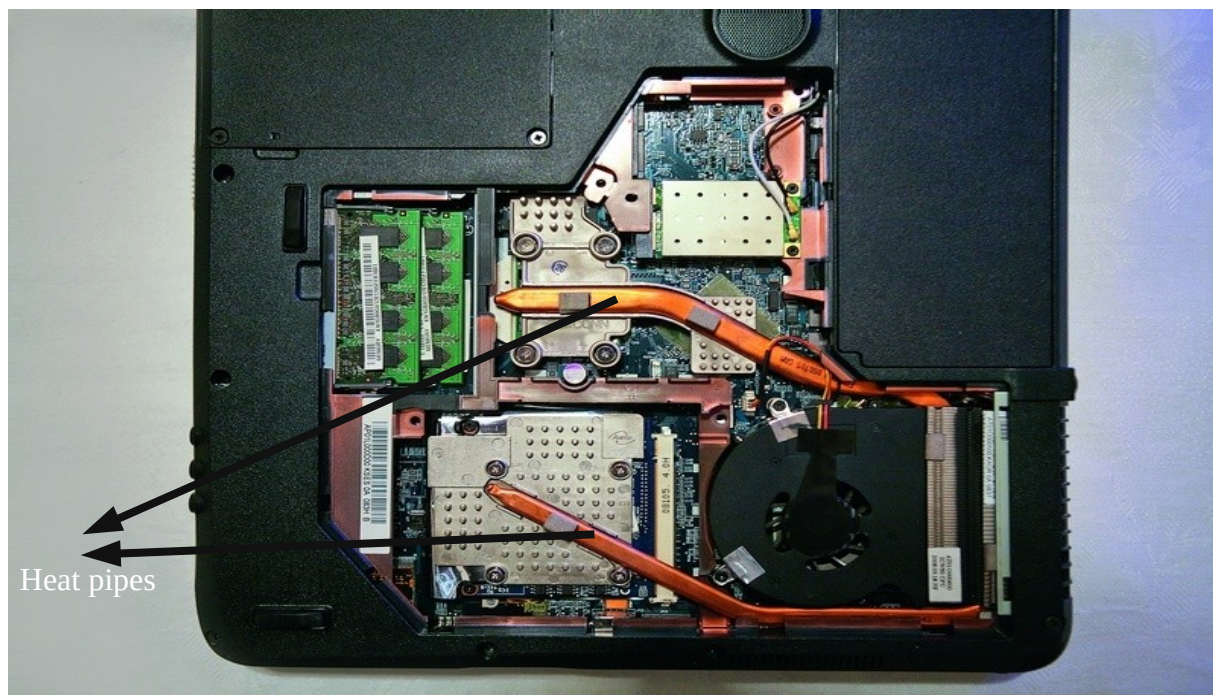
Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία εκθετική αύξηση στην αγορά ηλεκτρονικών συσκευών σε σχέση με τις εφαρμογές που επιτελούν. Οι συσκευές αυτές συνεχίζουν να μειώνονται σε μέγεθος καταλαμβάνοντας λιγότερο χώρο, ενώ παράλληλα υπάρχει απαίτηση για όλο και μεγαλύτερη ευελιξία, πρακτικότητα, ταχύτητα κι υπολογιστική ισχύ. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερη συσσώρευση θερμότητας ανά μονάδα όγκου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα<sup>[1]</sup> (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Χρονολογική εξέλιξη της θερμορροής των επεξεργαστών των Η/Υ

Αυτή ακριβώς η συσσώρευση θερμότητας στους πυρήνες θα πρέπει να διατηρείται σε κάποια αποδεκτά επίπεδα, διότι διαφορετικά πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας εκτός ορίων θα μπορούσε να αποβεί καταστρεπτική για ένα τμήμα ή ολόκληρη τη συσκευή. Προς αυτήν, λοιπόν, τη κατεύθυνση κινείται η συνεπακόλουθη χρήση συστημάτων ψύξης κι απαγωγής θερμότητας στις προαναφερθείσες μηχανές, ώστε να ελέγχεται η αύξηση της θερμοκρασίας και να προλαμβάνονται φαινόμενα υπερθέρμανσης στους πυρήνες και κατ' επέκταση στο εσωτερικό των ηλεκτρονικών συσκευών<sup>[1]</sup>.

Η χρήση των αγωγών θερμότητας (*heat pipes*) την τελευταία δεκαετία εξυπηρετεί αυτήν ακριβώς την απαίτηση για ελεγχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στους πυρήνες των ηλεκτρονικών υπολογιστών κι ιδιαίτερα στους επεξεργαστές των *laptops*. Το συγκεκριμένο σύστημα απαγωγής θερμότητας είναι παθητικού τύπου, έχει πολύ μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα απ' οποιοδήποτε άλλο συμπαγές υλικό κι έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει μεγάλα ποσά θερμότητας απ' το ένα άκρο στο άλλο με πολύ μικρή θερμοκρασιακή διαφορά. Βέβαια, το στοιχείο εκείνο που κάνει κυρίαρχη τη χρήση των *heat pipes* και την εγκατάστασή τους στα *laptops* και τα *notebooks* κυρίως, είναι η ικανότητά τους να καταλαμβάνουν μικρό όγκο, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία για τις εφαρμογές και τις εργασίες που εξυπηρετούν οι συγκεκριμένες συσκευές (Εικόνες 1.1 & 1.2).



Εικόνα 1.1 Αγωγοί θερμότητας στο εσωτερικό ενός φορητού υπολογιστή (*laptop*)



Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει κυρίως τα εξής δύο θέματα:

- το κατά πόσον η απόκριση ενός συστήματος τοπικής θέρμανσης κι απαγωγής θερμότητας στον πυρήνα, όπως είναι ο επεξεργαστής των Η/Υ μαζί με το *heat pipe*, ακολουθεί τη συμπεριφορά των συστημάτων 1<sup>ης</sup> τάξεως όταν υπόκειται σε μεταβαλλόμενη διέγερση (βηματική ή περιοδική) και
- τη σημασία του προσανατολισμού του *heat pipe* (οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο) στην ψυκτική απόδοση ολόκληρου του συστήματος.



Εικόνα 1.2 Αγωγός θερμότητας στο εσωτερικό ενός *notebook*

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αρχικά αναφορά στις θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής και της μετάδοσης θερμότητας, ακολουθεί η ανάλυση των βασικών νόμων κι εξισώσεων που διέπουν τα συστήματα 1<sup>ης</sup> τάξεως κατά την επιβαλλόμενη διέγερσή τους. Τέλος, γίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας των αγωγών θερμότητας, σύντομη ιστορική αναδρομή της εξέλιξής τους και των περιορισμών κατά τη λειτουργία τους.

### 2.1 Αρχές Θερμοδυναμικής

#### 2.1.1 Εσωτερική ενέργεια, θερμότητα και ειδική θερμοχωρητικότητα

Η *εσωτερική ενέργεια* ( $U$ ) ενός θερμοδυναμικού συστήματος είναι ένα είδος μικροσκοπικής μορφής ενέργειας η οποία εξαρτάται από την μοριακή δομή του θερμοδυναμικού συστήματος και τον βαθμό μοριακής δραστηριότητάς του. Κατά συνέπεια, σχετίζεται με την κινητική και δυναμική ενέργεια των μορίων που συνθέτουν το σύστημα, τη λεγόμενη *αισθητή ενέργεια*, τις δυνάμεις μεταξύ των μορίων, δηλαδή τη φάση στην οποία βρίσκεται το σύστημα, την επονομαζόμενη *λανθάνουσα ενέργεια*, τους χημικούς δεσμούς σε μικροσκοπικό επίπεδο, δηλαδή την *χημική ενέργεια* και τις δυνάμεις μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων στο πυρήνα του κάθε ατόμου, αυτό που ορίζουμε *πυρηνική ενέργεια*. Η εσωτερική ενέργεια είναι ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει την ενεργειακή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το θερμοδυναμικό σύστημα και για ορισμένη μάζα του  $m$  ορίζεται η *ειδική εσωτερική ενέργεια* ( $u$ ) ως το πηλίκο της ολικής εσωτερικής ενέργειας προς τη μάζα του, δηλαδή<sup>[2]</sup>:

$$u = \frac{U}{m} \quad \left( \frac{J}{Kg} \right) \quad (2.1)$$

Η *θερμότητα* ( $Q$ ) είναι η μορφή ενέργειας που ανταλλάσσει ένα θερμοδυναμικό σύστημα με το περιβάλλον του λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τους, πραγματοποιείται διαμέσου των ορίων (πραγματικών ή νοητών) του συστήματος και διαρκεί όσο χρόνο υπάρχει η θερμοκρασιακή διαφορά. Επίσης, δεν αποτελεί στατικό

μέγεθος, όπως συμβαίνει με την εσωτερική ενέργεια αλλά είναι μέγεθος που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας και πραγματοποιείται πάντα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα. Επιπρόσθετα, ορίζεται η *ειδική θερμότητα* ( $q$ ) ως<sup>[2]</sup>:

$$q = \frac{Q}{m} \left( \frac{J}{Kg} \right) \quad (2.2)$$

κι εκφράζει το ποσό θερμότητας που συναλλάσσει με το περιβάλλον του η μονάδα μάζας του υλικού που βρίσκεται εντός του θερμοδυναμικού συστήματος.

Σύμφωνα με τον θεμελιώδη νόμο της Θερμιδομετρίας, η θερμότητα που πρέπει να προσφερθεί σ' ένα σώμα μάζας  $m$  προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά  $\Delta T$  δίδεται από τη σχέση:

$$Q = m * C_{υλικού} * \Delta T \quad (2.3)$$

όπου  $C_{υλικού}$   $\left( \frac{J}{Kg * K} \right)$  ορίζεται το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί στη μονάδα μάζας ενός υλικού σώματος προκειμένου η θερμοκρασία να αυξηθεί κατά  $1K$  κι ονομάζεται *ειδική θερμοχωρητικότητα* του υλικού. Τα στερεά και τα υγρά έχουν μία ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_{υλικού}$  της οποίας η τιμή δεν εξαρτάται από τις συνθήκες που βρίσκεται το υλικό, ενώ τα αέρια έχουν δύο ειδικές θερμοχωρητικότητες ανάλογα με τον τρόπο θέρμανσης ή ψύξης τους (υπό σταθερό όγκο  $C_v$  ή υπό σταθερή πίεση  $C_p$ ).

### 2.1.2 Διεργασία και καμπύλη αλλαγής φάσης νερού

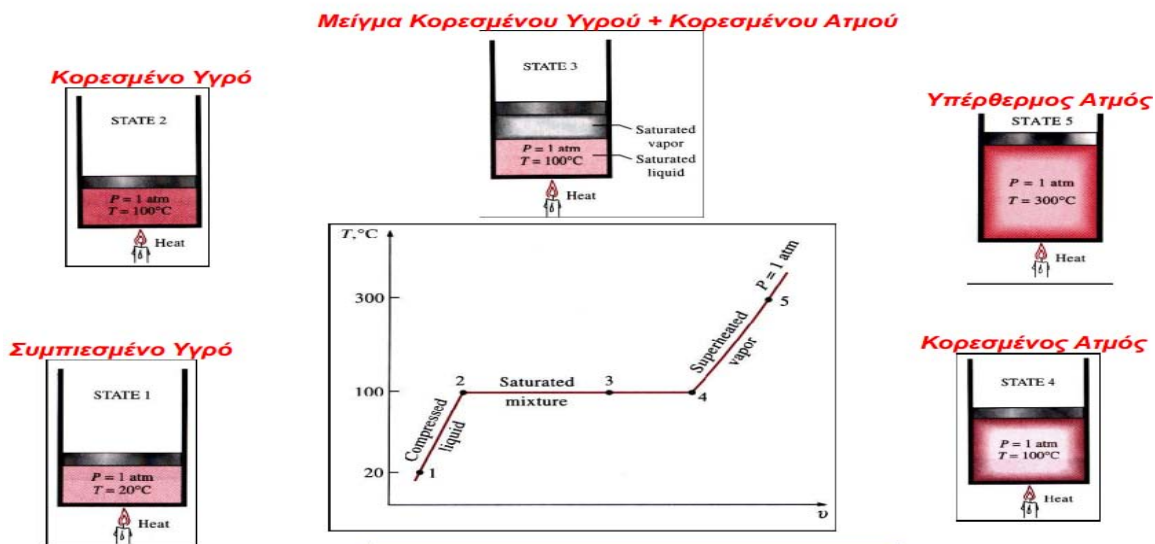
Η μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη ονομάζεται *αλλαγή φάσης*. Εάν μια ουσία βρίσκεται σε συγκεκριμένη και σταθερή πίεση, τότε η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα κάτω από σταθερή θερμοκρασία και συνοδεύεται πάντοτε από συναλλαγή θερμότητας κι από μεταβολή του όγκου και της πυκνότητας της ουσίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το νερό, το οποίο “βράζει στους  $100^\circ C$ , όταν βρίσκεται σε πίεση  $1 atm$ ”. Το νερό, του οποίου η χρήση του ως εργαζόμενου μέσου θα μελετηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί μία καθαρή ουσία διότι η χημική του σύσταση παραμένει σταθερή σε όλη την έκταση. Η θερμοκρασία βρασμού του για συγκεκριμένη πίεση ονομάζεται *θερμοκρασία κορεσμού*  $T_{sat}$  κι η πίεση βρασμού για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία ονομάζεται *πίεση κορεσμού*  $P_{sat}$ .



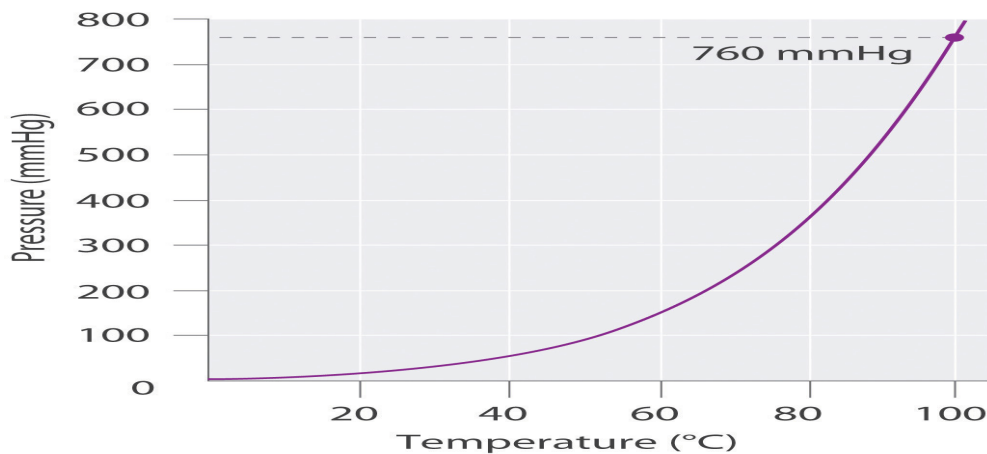


## Διεργασία Αλλαγής Φάσης Ύλης



Σχήμα 2.1 Τα στάδια της διεργασίας αλλαγής φάσης του νερού σε κορεσμένο ατμό<sup>[2]</sup>

Στο σχήμα 2.1 αποτυπώνεται η διεργασία αλλαγής φάσης του νερού σε κορεσμένο ατμό με τις σχετικές θερμοκρασίες και πιέσεις, οι οποίες όταν τοποθετηθούν σε κατάλληλο διάγραμμα (Σχήμα 2.2), προκύπτει η καμπύλη κορεσμού αερίου-υγρού για το νερό. Αντίστοιχες καμπύλες κορεσμού μπορούν να προκύψουν από πίνακες θερμοκρασιών-πιέσεων κορεσμού για όλες σχεδόν τις ουσίες.

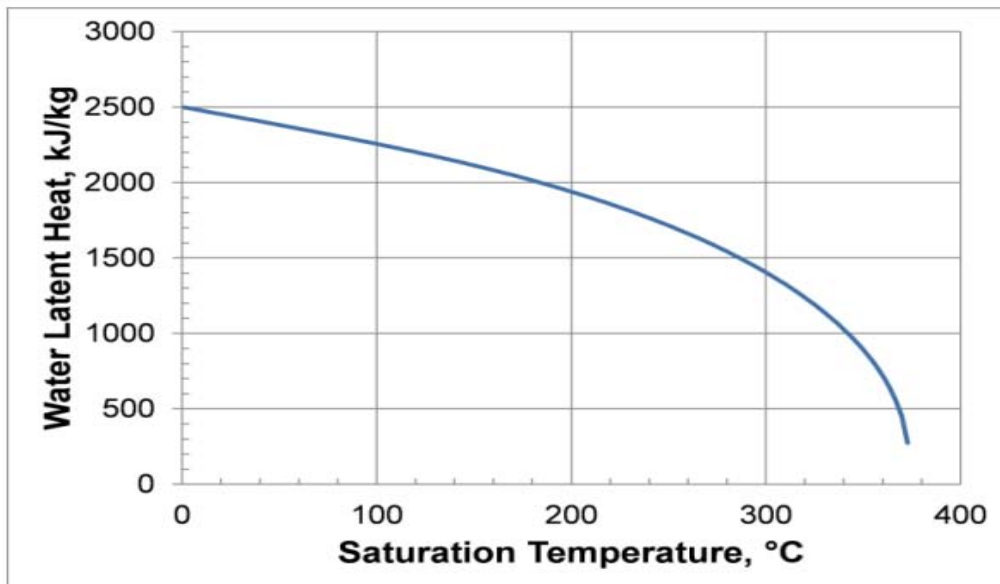


Σχήμα 2.2 Καμπύλη κορεσμού αερίου-υγρού για το νερό ( $760 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm}$ )

Το ποσό θερμότητας που συναλλάσσει μία ορισμένη ποσότητα της ύλης προκειμένου να λάβει εξ' ολοκλήρου αλλαγή της φάσης της ονομάζεται *λανθάνουσα θερμότητα*. Έτσι, η *θερμότητα ατμοποίησης* ή *λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης* του νερού είναι η θερμότητα εκείνη που απαιτείται για τη πλήρη ατμοποίηση 1 Kg νερού το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία κορεσμού  $T_{sat}$ , ενώ η *θερμότητα υγροποίησης* είναι η ενέργεια (θερμότητα) που απαιτείται να απομακρυνθεί από τη μάζα του νερού που βρίσκεται υπό συνθήκες αναφοράς (πίεση και θερμοκρασία) προκειμένου αυτή να μεταβεί από αέρια σε υγρή φάση. Κάτι ανάλογο συμβαίνει με τη *λανθάνουσα θερμότητα τήξης* και *πήξης* του νερού<sup>[2]</sup>.

Κατ' αναλογία με το σχήμα 2.2, απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα (Σχήμα 2.3) οι τιμές της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης του νερού ( $WLH$ ) σε σχέση με τη θερμοκρασία κορεσμού  $T_{sat}$ . Στο συγκεκριμένο σχήμα, στο εύρος τιμών θερμοκρασίας που μας ενδιαφέρει [0°C-100°C], γίνεται εμφανής η γραμμικότητα των δύο μεγεθών του διαγράμματος, τα οποία σχετίζονται μεταξύ τους με τη συνάρτηση:

$$WLH = -2,429 * T_{sat} + 2500 \left( \frac{KJ}{Kg} \right) \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.3 Λανθάνουσα θερμότητα νερού σε σχέση με τη θερμοκρασία κορεσμού  $T_{sat}$

## 2.2 Μετάδοση Θερμότητας

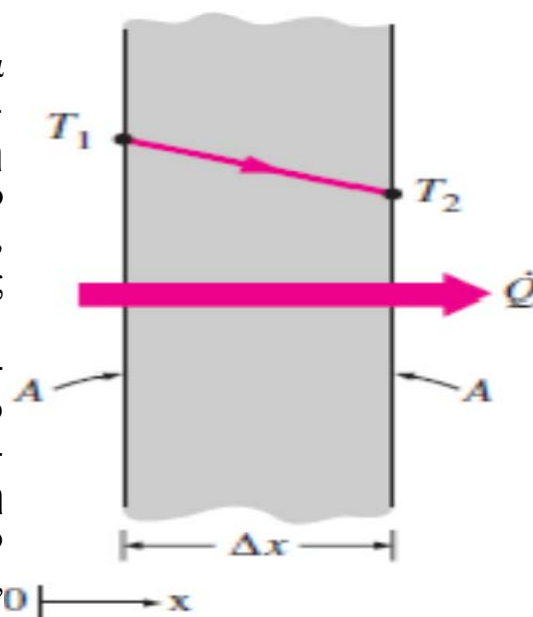
Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί είτε με έναν είτε με συνδυασμό όλων ή μερικών από τους ακόλουθους τρόπους: μέσω αγωγής, συναγωγής κι ακτινοβολίας. Όλοι οι τρόποι μεταφοράς απαιτούν την ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας ενώ η ενέργεια μεταφέρεται πάντοτε από το μέσο με την υψηλότερη θερμοκρασία προς αυτό με την χαμηλότερη. Οι δύο πρώτοι τρόποι λαμβάνουν χώρα οπωσδήποτε με τη παρουσία κάποιου υλικού μέσου ενώ ο τρίτος δε προϋποθέτει να συμβαίνει κάτι τέτοιο.

### 2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Η αγωγή είναι η μεταφορά ενέργειας από τα σωματίδια μιας ουσίας με την περισσότερη ενέργεια προς τα γειτονικά τους με την μικρότερη ενέργεια κι οφείλεται στις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, ενώ λαμβάνει χώρα τόσο στα στερεά και τα υγρά όσο και στα αέρια σώματα. Στα υγρά και στα αέρια, η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και τη διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους, ενώ στα στερεά συμβαίνει λόγω του συνδυασμού των ταλαντώσεων των μορίων σε μια δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Ο ρυθμός αγωγής θερμότητας μέσα από ένα υλικό μέσο εξαρτάται από τη γεωμετρία του μέσου (επίπεδη, κυλινδρική ή σφαιρική επιφάνεια), το πάχος του  $\Delta x$ , το υλικό κατασκευής (μέταλλο, πλαστικό, ξύλο κ.α.) και τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

Εξετάζεται η μόνιμη αγωγή θερμότητας διαμέσου ενός μεγάλου επίπεδου τοίχου πάχους  $\Delta x = L$  κι επιφάνειας κάθετης στη ροή θερμότητας  $A$  όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ελεύθερων επιφανειών είναι  $\Delta T = T_2 - T_1$ , όπως παριστάνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας

Πειράματα απέδειξαν ότι ο ρυθμός αγωγής θερμότητας δια μέσου ενός επιπέδου στρώματος είναι ανάλογος προς τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του στρώματος και προς την επιφάνεια μεταφοράς αλλά αντιστρόφως ανάλογος προς το πάχος του στρώματος, δηλαδή ισχύει<sup>[3]</sup>:

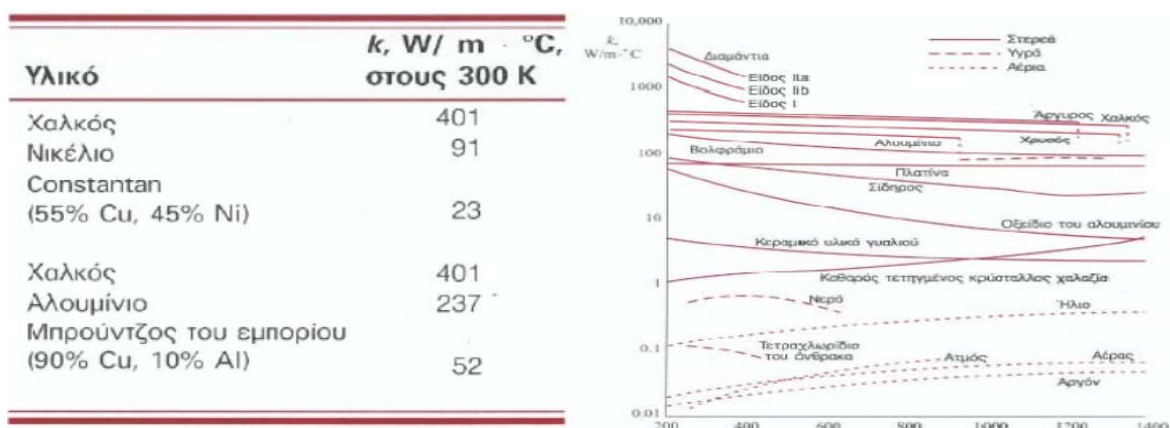
$$Q_{cond} = \lambda * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

όπου η σταθερά αναλογίας  $\lambda$  αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει θερμότητα κι ονομάζεται *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας* του υλικού. Στην οριακή περίπτωση όπου  $\Delta x \rightarrow 0$ , η σχέση (2.5) γράφεται:

$$Q_{cond} = \frac{dQ_{cond}}{dt} = -\lambda * A * \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

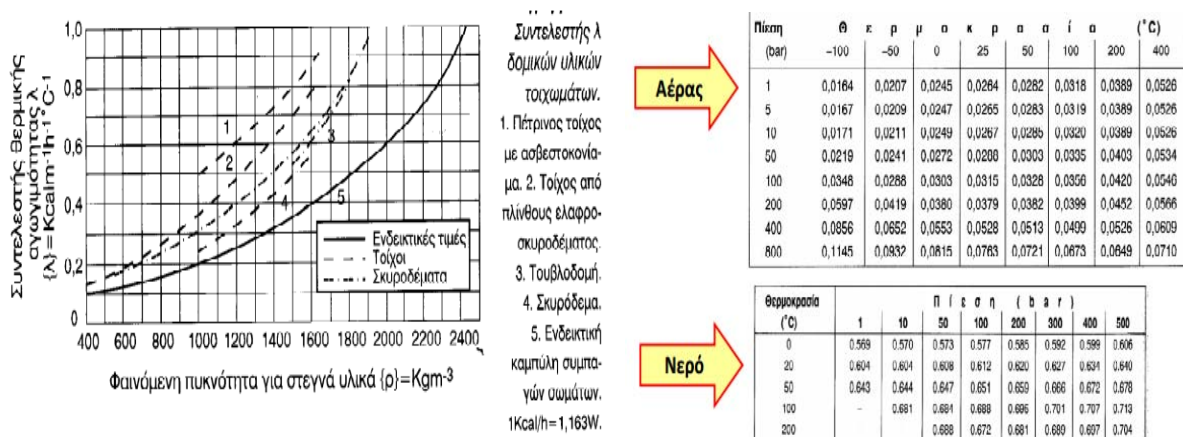
Η ανωτέρω σχέση αποτελεί την μαθηματική έκφραση του *νόμου του Fourier* για την αγωγή.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  προσδιορίζεται συνήθως πειραματικά, αποτελεί φυσική ιδιότητα του κάθε υλικού και καθορίζει το πόσο καλός αγωγός της θερμότητας είναι το υλικό. Μονάδες μέτρησης είναι τα  $\frac{W}{m \cdot K}$  ή  $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot C}$ . Ο  $\lambda$  ενός κράματος είναι συνήθως πολύ μικρότερος από τον  $\lambda$  του κάθε μετάλλου, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του υλικού, το πορώδες (όσο περισσότερο πορώδες είναι ένα υλικό τόσο μειώνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ ) (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Αριστερά: Σύγκριση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  καθαρού χαλκού και κραμάτων του και Δεξιά: Εξάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  από τη θερμοκρασία για διάφορα στοιχεία<sup>[2]</sup>

Επίσης, ο  $\lambda$  εξαρτάται από την πυκνότητα (η αύξηση της πυκνότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους με αποτέλεσμα ο  $\lambda$  να αυξάνεται), την πίεση (στα υγρά και τα αέρια αύξηση της πίεσης προκαλεί αύξηση του  $\lambda$ ) και την υγρασία (εάν αντικατασταθεί ο αέρας που υπάρχει στη μάζα ενός υλικού από υδρατμό, ο  $\lambda$  μειώνεται, ενώ εάν τοποθετηθεί πάγος ή νερό, τότε ο  $\lambda$  αυξάνεται). Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 Αριστερά: Επίδραση της πυκνότητας στον συντελεστή  $\lambda$  και Δεξιά: Επίδραση της πίεσης στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ <sup>[2]</sup>

### 2.2.1.1 Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας κι εξίσωση θερμικής διάχυσης

Η πυκνότητα  $\rho$  κι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο  $C_p$  είναι δύο ιδιότητες που χρησιμοποιούνται συστηματικά στη θερμοδυναμική ανάλυση. Το γινόμενο  $\rho \cdot C_p$ , κοινώς γνωστό ως *ογκομετρική θερμοχωρητικότητα*, μετράει την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμική ενέργεια.

Επειδή ουσίες με μεγάλη πυκνότητα χαρακτηρίζονται από μικρές ειδικές θερμότητες, πολλά στερεά και υγρά, τα οποία είναι πολύ καλά μέσα αποθήκευσης ενέργειας, έχουν μετρήσιμες θερμοχωρητικότητες ( $\rho \cdot C_p > 1 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ ). Εξαιτίας της πολύ μικρής πυκνότητας, τα αέρια δεν ταιριάζουν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας ( $\rho \cdot C_p \sim 1 \text{ KJ/m}^3 \cdot \text{K}$ )<sup>[3]</sup>.

Ο *συντελεστής θερμικής διαχυτότητας*  $\alpha$  αποτελεί φυσική ιδιότητα κάθε υλικού και παριστάνει το πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμότητα διαμέσου ενός υλικού. Εκφράζει, δε, το πηλίκο της αγομένης θερμότητας μέσω του υλικού προς την αποθηκευμένη σε αυτό θερμότητα ανά μονάδα όγκου, δηλαδή:

$$\alpha \left( \frac{\text{m}^2}{\text{sec}} \right) = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (2.7)$$

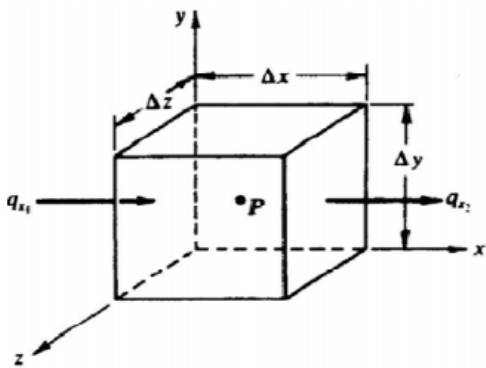




Οι τιμές για τον συντελεστή θερμικής διαχυτότητας  $\alpha$  για ορισμένα στοιχεία φαίνονται στο διπλανό πίνακα 2.1. Υλικά με μεγάλο  $\alpha$  θα ανταποκριθούν γρηγορότερα σε οποιαδήποτε αλλαγή στο θερμικό τους περιβάλλον, ενώ αυτά με το μικρό  $\alpha$  θα ανταποκριθούν πιο υποτονικά, καθυστερώντας να μεταβούν ξανά σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Υλικό	$\alpha, \text{m}^2/\text{s}^*$
Αργύρος	$149 \times 10^{-6}$
Χρυσός	$127 \times 10^{-6}$
Χαλκός	$113 \times 10^{-6}$
Αλουμίνιο	$97.5 \times 10^{-6}$
Σίδηρος	$22.8 \times 10^{-6}$
Υδράργυρος (υγρό)	$4.7 \times 10^{-6}$
Μάρμαρο	$1.2 \times 10^{-6}$
Πάγος	$1.2 \times 10^{-6}$
Τσιμέντο	$0.75 \times 10^{-6}$
Τούβλο	$0.52 \times 10^{-6}$
Βαρύ χώμα (ξηρό)	$0.52 \times 10^{-6}$
Γυαλί	$0.34 \times 10^{-6}$
Υαλοβάμβακας	$0.23 \times 10^{-6}$
Νερό (υγρό)	$0.14 \times 10^{-6}$
Βοδινό κρέας	$0.14 \times 10^{-6}$
Ξύλο (βελανιδιά)	$0.13 \times 10^{-6}$

Πίνακας 2.1 Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας  $\alpha$  για ορισμένα στοιχεία



Σχήμα 2.7 Ο διαφορικός όγκος ελέγχου σε ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων

Η εξίσωση της θερμικής διάχυσης βασίζεται στη θεώρηση ενός ομογενούς σώματος με μια κατανομή θερμοκρασίας που ορίζεται από την συνάρτηση  $T(x,y,z)$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Εφόσον υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές θα υπάρχει και ροή θερμότητας. Με τη μορφή διανυσμάτων παριστάνεται η ενέργεια που συναλλάσσει ο διαφορικός όγκος με το περιβάλλον. Για παράδειγμα, στη κατεύθυνση  $x$ , η ποσότητα  $q_x$  εκφράζει τη ροή της συναλλασσόμενης θερμότητας, μέσα από την επιφάνεια ελέγχου η οποία είναι κάθετη στον άξονα  $x$ . Όμοια η ποσότητα  $q_{x+\Delta x}$  αντιστοιχεί στην απέναντι επιφάνεια η οποία απέχει  $\Delta x$ . Ειδικότερα, θα ισχύει<sup>[2]</sup>:

$$q_{x+\Delta x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \quad (2.8)$$

Τα παραπάνω ισχύουν αντίστοιχα και για τις τρεις διευθύνσεις. Μπορεί, επίσης, μέσα στον όγκο ελέγχου να παράγεται ή να καταναλώνεται ενέργεια με συγκεκριμένο ρυθμό σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{\text{παρ}} = q_{\text{παρ}} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.9)$$

Εάν με  $E_{απ}$  συμβολιστεί η ανά μονάδα χρόνου μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας (εσωτερική ενέργεια) στον όγκο ελέγχου, τότε:

$$E_{απ} = \rho * C_p * \frac{\theta T}{\theta t} * dx * dy * dz \quad (2.10)$$

κι από την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας στον όγκο ελέγχου, προκύπτει η διαφορική εξίσωση για τη διάχυση θερμότητας μέσα σε ένα σώμα:

$$\frac{\theta(\lambda_x \frac{\theta T}{\theta x})}{\theta x} + \frac{\theta(\lambda_y \frac{\theta T}{\theta y})}{\theta y} + \frac{\theta(\lambda_z \frac{\theta T}{\theta z})}{\theta z} + q = \rho * C_p * \frac{\theta T}{\theta t} \quad (2.11)$$

Από τη παραπάνω σχέση, για μονοδιάστατη ροή θερμότητας (έστω ως προς  $x$ ),  $\lambda$  σταθερό, χωρίς τη παραγωγή θερμότητας εντός του όγκου ελέγχου &  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho * C_p}$  (Σχέση 2.7), προκύπτει:

$$\alpha * \frac{\theta^2 T}{\theta x^2} = \frac{\theta T}{\theta t} \quad (2.12)$$

που αποτελεί την εξίσωση θερμικής διάχυσης σε επίπεδο τοίχωμα. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία προκύπτει για τον εκτιμώμενο χρόνο διάχυσης της θερμότητας μέσα σ' ένα σώμα ότι:

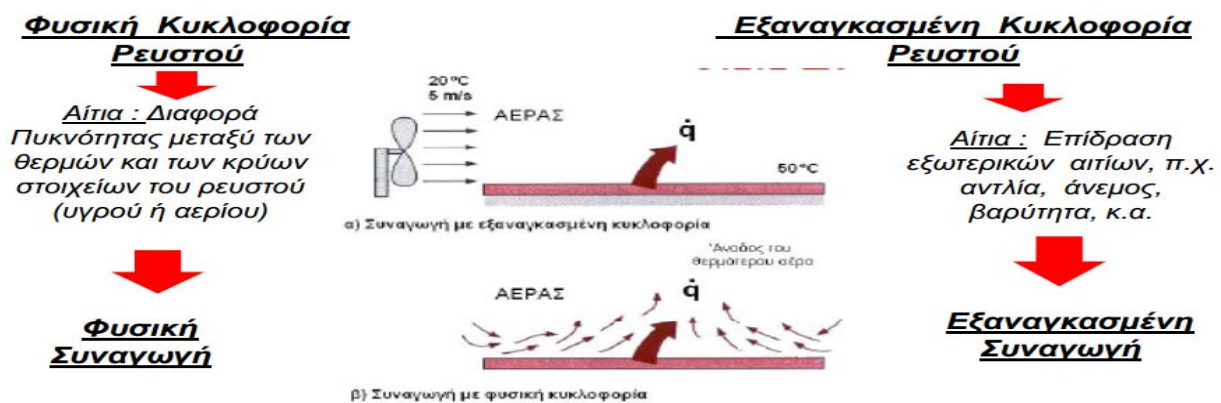
$$\Delta t = \frac{(\Delta x)^2}{\alpha} \quad (2.13)$$

όπου  $\Delta x$  η απόσταση διάχυσης της ροής θερμότητας και  $\alpha$  ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας.

### **2.2.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή**

Η *συναγωγή* είναι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και της γειτονικής της υγρής ή αέριας φάσης η οποία, όμως θα πρέπει να βρίσκεται σε κίνηση. Η συναγωγή θερμότητας περιλαμβάνει συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού, με αποτέλεσμα όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού τόσο εντονότερη είναι η συναγωγή θερμότητας. Για πλήρες ακίνητο ρευστό, η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει εξ ολοκλήρου χώρα μέσω της αγωγής<sup>[2]</sup>.

Η συναγωγή θερμότητας χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν, τη *φυσική συναγωγή* και την *εξαναγκασμένη*. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.8) αναπαριστώνται οι δύο διαφορετικοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας με συναγωγή.



Σχήμα 2.8 Τα φαινόμενα της φυσικής & εξαναγκασμένης συναγωγής θερμότητας<sup>[2]</sup>

Στη φυσική συναγωγή, η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές στη πυκνότητα του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο ρευστό. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή, το ρευστό αναγκάζεται να ρέει πάνω από μια επιφάνεια με τη βοήθεια εξωτερικών μέσων, όπως ενός ανεμιστήρα ή μιας αντλίας.

Οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας που περιλαμβάνουν μεταβολή της φάσης ενός υλικού θεωρείται ότι γίνονται με συναγωγή λόγω της κίνησης του ρευστού που επάγεται κατά την διάρκεια της διεργασίας (για παράδειγμα η ανύψωση φυσαλίδων ατμού κατά τον βρασμό).

Ο ρυθμός συναγωγής θερμότητας είναι ανάλογος προς τη διαφορά θερμοκρασίας και περιγράφεται ικανοποιητικά από τον νόμο της ψύξης του Newton ως ακολούθως:

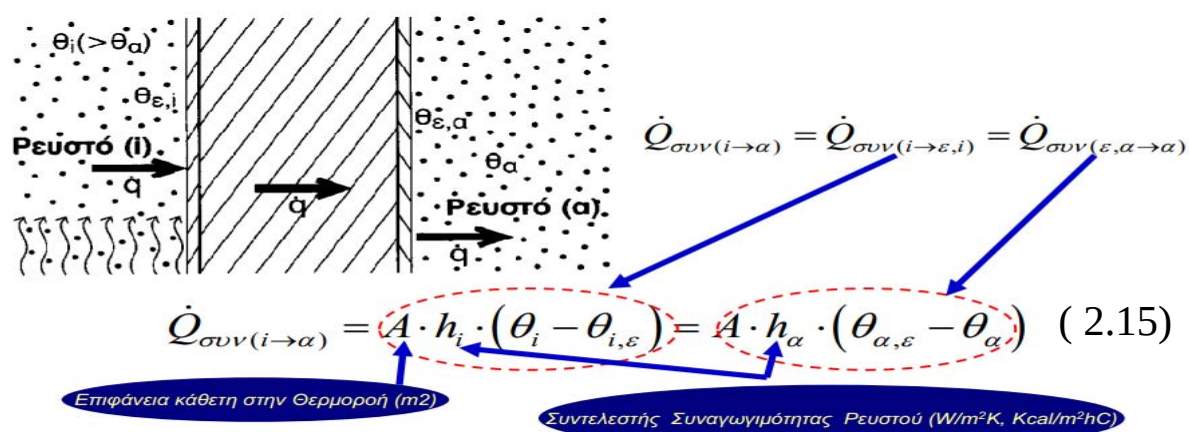
$$Q_{convection} = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad (2.14)$$

όπου  $h$  ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας του ρευστού ( $\frac{W}{m^2 * K}$ ),  $A$  η επιφάνεια μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η συναγωγή θερμότητας σε  $m^2$ ,  $T_s$  η θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας σε  $K$  και  $T_{\infty}$  η θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια σε  $K$ .





Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.9) περιγράφεται πιο αναλυτικά η εξίσωση συναγωγής (εξίσωση Newton).



Σχήμα 2.9 Το φαινόμενο της συναγωγής θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικού συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας<sup>[2]</sup>

Ο συντελεστής  $h$  είναι ένα μέγεθος που περιγράφει συνολικά τη ροή θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με αυτήν. Δεν αποτελεί φυσική ιδιότητα του ρευστού, όπως συμβαίνει με τους προαναφερθέντες συντελεστές στην αγωγή αλλά εξαρτάται από διάφορους άλλους παράγοντες, όπως το είδος και τη φύση της επιφάνειας του στερεού, τη διαφορά θερμοκρασίας μέσα στη μάζα του ρευστού, τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού και το είδος της κυκλοφορίας του σε σχέση με τη στερεή επιφάνεια (φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή). Στον διπλανό πίνακα (Πίνακας 2.2) αναγράφονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας για τους διάφορους τρόπους κυκλοφορίας του ρευστού.

Είδος συναγωγής	$h, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Ελεύθερη συναγωγή αερίων	2-25
Ελεύθερη συναγωγή υγρών	10-1000
Εξαναγκασμένη συναγωγή αερίων	25-250
Εξαναγκασμένη συναγωγή υγρών	50-20,000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500-100,000

Πίνακας 2.2 Τιμές του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας  $h$  για διάφορες κυκλοφορίες του ρευστού

### 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Η ακτινοβολία (Σχήμα 2.10) είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από την ύλη (στερεή ή υγρή ή αέρια) με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων). Σε αντίθεση με την αγωγή ή τη συναγωγή, η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη ή όχι ενδιάμεσου υλικού αλλά επηρεάζεται από την διαύγειά του. Στη μετάδοση θερμότητας ενδιαφέρει η θερμική ακτινοβολία, η οποία αποτελεί την μορφή ενέργειας που εκπέμπουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η οποία διαφέρει από τις άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως οι ακτίνες X ή τα μικροκύματα<sup>[2]</sup>.

Ο μέγιστος ρυθμός ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει μια επιφάνεια σε απόλυτη θερμοκρασία  $T_s$  δίνεται από τον Νόμο Stefan-Boltzmann:

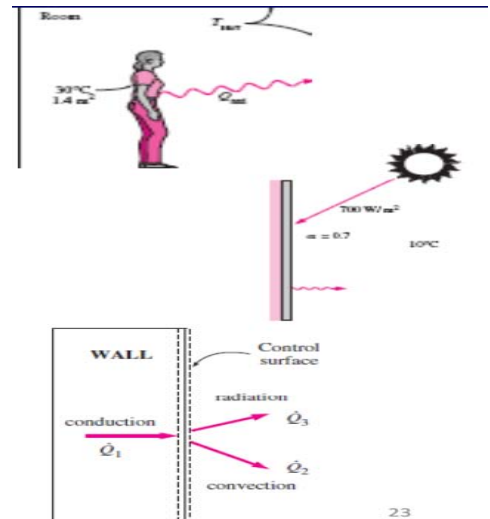
$$Q_{emit,max} = \sigma * A * T_s^4 \quad (2.16)$$

όπου  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann σε  $(\frac{W}{m^2 * K^4})$  και  $A$  η επιφάνεια της οποίας επιτυγχάνεται η ακτινοβολία θερμότητας σε  $m^2$ .

Η ιδανική εκείνη επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με τον μέγιστο ρυθμό ονομάζεται μέλαν σώμα. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία κι εκφράζεται ως:

$$Q_{emit} = \varepsilon * Q_{emit,max} \quad (2.17)$$

όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής επιφάνειας. Ο συντελεστής  $\varepsilon$  αποτελεί το μέτρο του πόσο μια πραγματική επιφάνεια προσεγγίζει από άποψη ακτινοβολούμενης θερμικής ενέργειας, το μέλαν σώμα για το οποίο ισχύει  $\varepsilon = 1$  και λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$  (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.10 Το φαινόμενο της ακτινοβολίας θερμότητας

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα μιας στερεής επιφάνειας είναι η ικανότητα απορρόφησης της προσπίπτουσας σε αυτή ακτινοβολίας. Η ικανότητα αυτή χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή απορροφητικότητας  $\alpha$  της επιφάνειας, ο οποίος είναι το πηλίκο της προσπίπτουσας προς την απορροφούμενη ακτινοβολία κι επίσης παίρνει τιμές στο πεδίο  $[0, 1]$ . Για το μέλαν σώμα ισχύει  $\alpha=1$ , δηλαδή απορροφάει ολόκληρη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό.

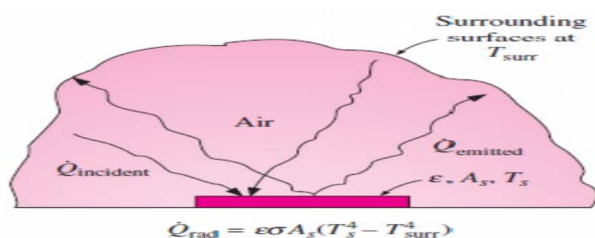
Οι συντελεστές  $\varepsilon$  και  $\alpha$  μιας επιφάνειας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ο Νόμος του Kirchhoff για την ακτινοβολία δηλώνει ότι η ικανότητα εκπομπής  $\varepsilon$  κι η ικανότητα απορρόφησης  $\alpha$  μιας επιφάνειας είναι ίσες μεταξύ τους στην ίδια θερμοκρασία και το ίδιο μήκος κύματος, δηλαδή ισχύει  $\varepsilon=\alpha$ .

Ο ρυθμός με τον οποίο μια επιφάνεια απορροφάει ακτινοβολία θα είναι:

$$Q_{\text{absorbed}} = \alpha \cdot Q_{\text{incident}} \quad (2.18)$$

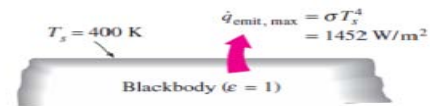
όπου  $Q_{\text{incident}}$  η προσπίπτουσα στην επιφάνεια θερμική ακτινοβολία. Η διαφορά μεταξύ του ρυθμού εκπομπής της ακτινοβολίας από την επιφάνεια και του ρυθμού απορρόφησης της ακτινοβολίας εκφράζει τον καθαρό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία.

Όταν μια επιφάνεια εμβαδού  $A$  με συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  και σε απόλυτη θερμοκρασία  $T_s$  περικλείεται από μια πολύ μεγαλύτερη (ή μαύρη) επιφάνεια σε απόλυτη θερμοκρασία  $T_{\text{sur}}$ , οι οποίες διαχωρίζονται με ένα αέριο (πχ. αέρας) που δεν παρεμβαίνει στην ακτινοβολία, ο καθαρός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ αυτών των δύο επιφανειών θα είναι:



$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (2.19)$$

Σχήμα 2.12 Η ακτινοβολία θερμότητας μιας επιφάνειας προς το περιβάλλον



Material	Emissivity
Aluminum foil	0.07
Anodized aluminum	0.82
Polished copper	0.03
Polished gold	0.03
Polished silver	0.02
Polished stainless steel	0.17
Black paint	0.98
White paint	0.90
White paper	0.92–0.97
Asphalt pavement	0.85–0.93
Red brick	0.93–0.96
Human skin	0.95
Wood	0.82–0.92
Soil	0.93–0.96
Water	0.96
Vegetation	0.92–0.96

Σχήμα 2.11 Πίνακας τιμών του συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  για διάφορες επιφάνειες

## 2.3 Γραμμικά Συστήματα

Πολλές φορές, αν κι όχι πάντοτε, τα δυναμικά συστήματα που απαντώνται στη φύση μπορούν να περιγραφούν επαρκώς με τη χρήση κατάλληλων γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Τα συστήματα αυτά τότε ονομάζονται *γραμμικά* και οι εξισώσεις οι οποίες τα περιγράφουν είναι στη γενική περίπτωση *μη ομογενείς γραμμικές διαφορικές εξισώσεις*.

Η εξίσωση που περιγράφει ένα τέτοιο σύστημα, για μεταβλητή εισόδου  $x$ , μεταβλητή εξόδου  $y$  και μοναδιαίο εύρος εισόδου θα έχει την γενική μορφή<sup>[4]</sup>:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = x(t) \quad (2.20)$$

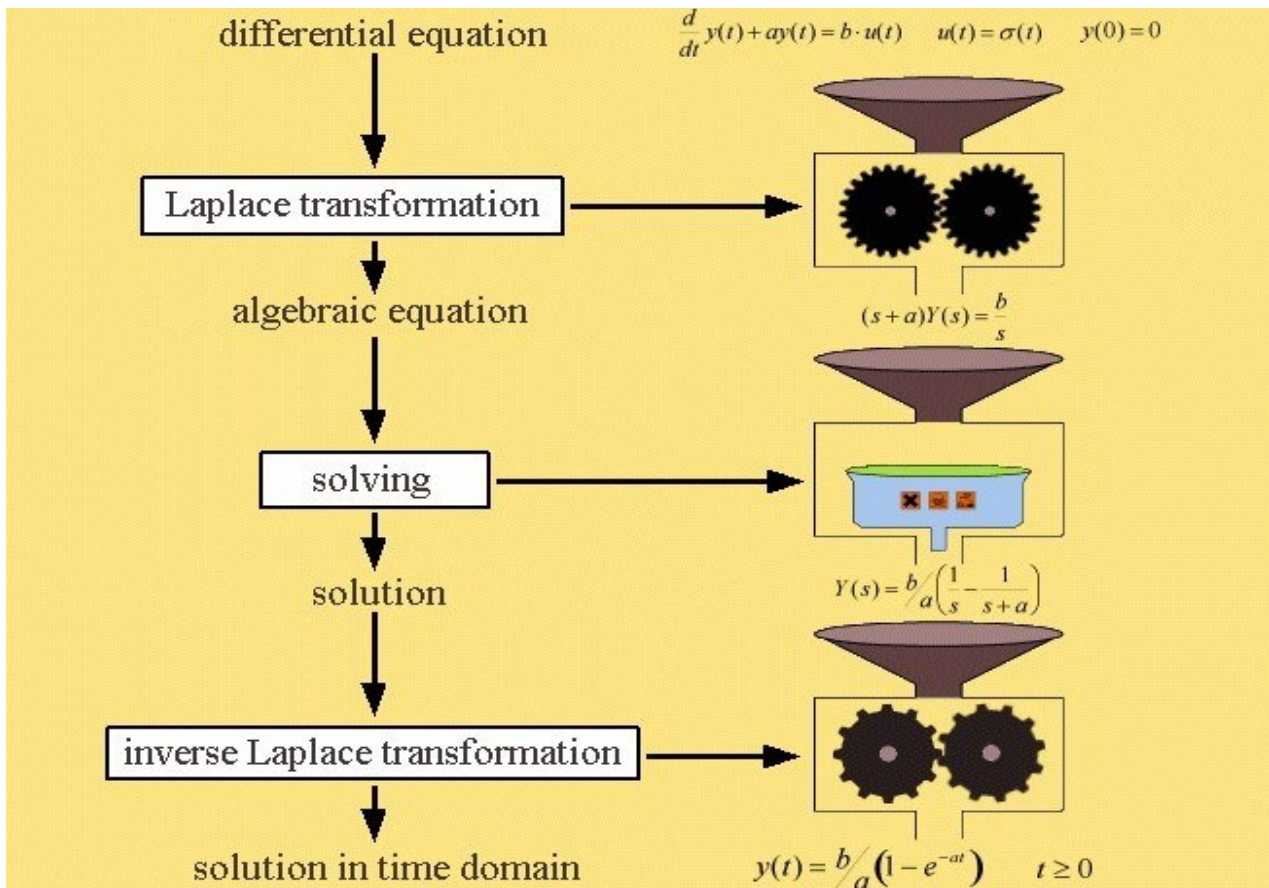
όπου οι συντελεστές  $a_n, \dots, a_0$  είναι σταθερές στη γενική περίπτωση. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να είναι συναρτήσεις του χρόνου  $t$  όχι όμως του  $y$ .

Ο όρος στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης είναι μία χαρακτηριστική σχέση της διαφορικής εξίσωσης και περιλαμβάνει τις πληροφορίες που χαρακτηρίζουν την φυσική του υπό μελέτη συστήματος, καθώς και πώς αυτό θα παρέχει έξοδο όταν διεγερθεί. Ο όρος στην δεξιά πλευρά της εξίσωσης χαρακτηρίζει την ενεργούσα συνάρτηση ή αλλιώς το σήμα εισόδου που εφαρμόζεται στο υπό μελέτη σύστημα.

Το γεγονός ότι και τα δυο μέλη της εξίσωσης αποτελούνται, όπως προαναφέραμε, από γραμμικές διαφορικές εξισώσεις επιτρέπει την εφαρμογή μετασχηματισμού *Laplace* σε αυτή. Ο μετασχηματισμός *Laplace* αποτελεί ουσιαστικά μια μετατροπή του μαθητικού μοντέλου του εξεταζόμενου συστήματος από το πεδίο του χρόνου (Σχέση 2.20) στο πεδίο των συχνοτήτων (συνάρτηση μεταφοράς)<sup>[5]</sup>.

Ο μετασχηματισμός *Laplace* και η χρήση της συνάρτησης μεταφοράς αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων διότι στο πεδίο των συχνοτήτων μετατρέπονται σε αλγεβρικές. Στη συνέχεια, με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού *Laplace* μπορούμε να μετατρέψουμε τη λύση-έξοδο του συστήματος και πάλι στο πεδίο του χρόνου. Παραδείγματα διάφορων τάξεων συστημάτων με τις διαφορικές εξισώσεις που τα περιγράφουν στο πεδίο του χρόνου καθώς και τις αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς στο πεδίο των συχνοτήτων φαίνονται στο παρακάτω δύο σχήματα (Σχήματα 2.13 & 2.14).





Σχήμα 2.13 Ο μετασχηματισμός *Laplace* κι ο αντίστροφός του για μια διαφορική εξίσωση<sup>[6]</sup>

zero order	$a_0 y = x(t)$	$\Rightarrow$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = 1$
first order	$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t)$	$\Rightarrow$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$
second order	$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t)$	$\Rightarrow$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$
$n$ th order	$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = x(t)$	$\Rightarrow$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \dots (\tau_n s + 1)}$

Σχήμα 2.14 Παραδείγματα μετασχηματισμού *Laplace* διαφορικών εξισώσεων διαφόρων βαθμών<sup>[4]</sup>

Αναλυτικότερη επεξήγηση της χρησιμοποίησης του μετασχηματισμού αυτού θα γίνει στην επόμενη ενότητα όπου θα γίνει χρήση του για τον υπολογισμό της απόκρισης συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως για διάφορες εισόδους.

### 2.3.1 Γραμμικά συστήματα 1<sup>ης</sup> τάξεως

Η μη ομογενής γραμμική διαφορική εξίσωση στο πεδίο του χρόνου που περιγράφει ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως στη γενική περίπτωση θα έχει την μορφή<sup>[4],[7]</sup>:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \quad (2.21)$$

όπου, όπως έχει ήδη αναφερθεί,  $y(t)$  είναι η απόκριση-έξοδος του συστήματος και  $x(t)$  η ενεργούσα εξωτερική συνάρτηση διέγερσης του συστήματος ή πιο απλά η είσοδος σε αυτό.

Η εξίσωση (2.21) διαιρώντας με το  $a_0$  μπορεί να ξαναγραφτεί στη μορφή<sup>[7]</sup>:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx(t) \quad (2.22)$$

όπου  $\tau = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$  έχει μονάδες χρόνου κι ονομάζεται *χρονική σταθερά* (*time constant*) του συστήματος και  $k = \frac{1}{\alpha_0}$  το *κέρδος* (*gain*) του συστήματος.

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό *Laplace* στην εξίσωση (2.22) μπορούμε να υπολογίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς για ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως στη γενική της μορφή<sup>[4]</sup>:

$$\tau sY(s) + Y(s) = kX(s) \quad (2.23)$$

και με αναδιάταξη των όρων προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς ως εξής:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2.24)$$

Παρατηρείται λοιπόν, ότι γνωρίζοντας την είσοδο  $x(t)$  σε ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως μπορεί, εφαρμόζοντας μετασχηματισμό *Laplace*, να υπολογιστεί το  $X(s)$ .

Στη συνέχεια, με τη χρήση της συνάρτησης μεταφοράς  $G(s)$  μπορούμε να καταλήξουμε στο  $Y(s)$  κι έπειτα με την χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού *Laplace* να βρούμε την απόκριση του συστήματος  $y(t)$  στο πεδίο των χρόνων.

Επίσης, φαίνεται ότι η απόκριση του συστήματος εξαρτάται τόσο από την φύση του (τάξη συστήματος κι αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς) όσο κι από την είσοδο σε αυτό, άρα για να υπολογιστεί η απόκριση πρέπει να έχουμε και τα δύο γνωστά. Έχοντας βρει τη συνάρτηση μεταφοράς για ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά η απόκριση του συστήματος για γνωστές συναρτήσεις εισόδου. Παρακάτω, θα υπολογίσουμε αναλυτικά την απόκριση του συστήματος για δύο διαφορετικές συναρτήσεις εισόδου, τη βηματική και την ημιτονοειδή, οι οποίες και μας ενδιαφέρουν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

### 2.3.2 Απόκριση συστημάτων 1<sup>ης</sup> τάξεως σε βηματική είσοδο

Η βηματική είσοδος με τιμή  $A$  κι η οποία εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή  $t=0$  στο σύστημα, στο πεδίο του χρόνου περιγράφεται από την συνάρτηση<sup>[7],[8]</sup>:

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & t > 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Η έκφραση του μετασχηματισμού *Laplace* για την είσοδο στο πεδίο των συχνοτήτων θα είναι:

$$X(s) = \frac{A}{s} \quad (2.26)$$

Με τη χρήση των σχέσεων (2.24) και (2.26) μπορούμε να υπολογίσουμε την απόκριση του συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων η οποία θα δίδεται από τη σχέση<sup>[4]</sup>:

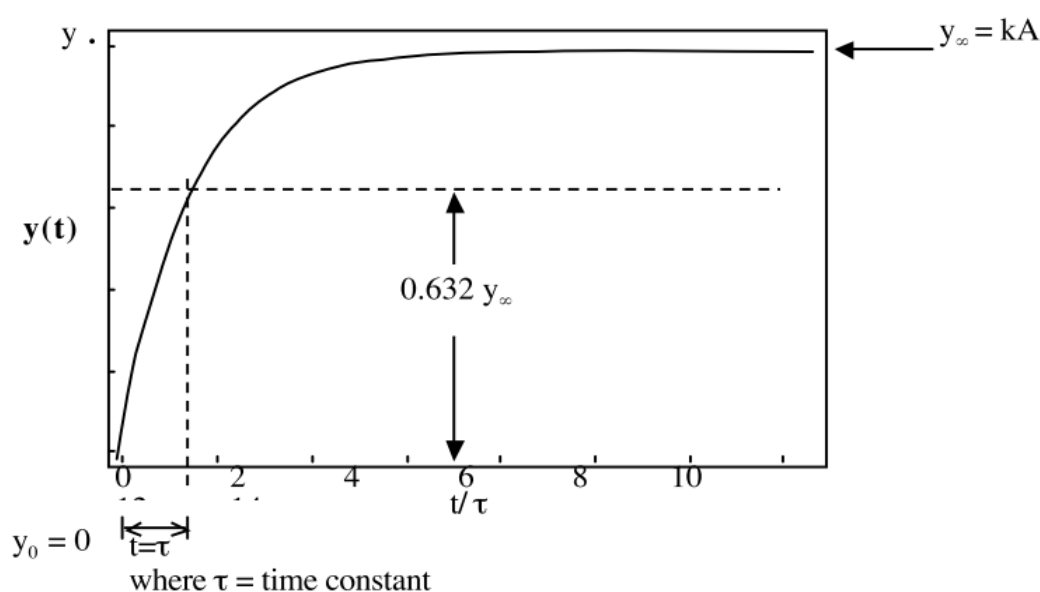
$$Y(s) = G(s) X(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot \frac{A}{s} \quad (2.27)$$

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό *Laplace* για τη σχέση (2.27) προκύπτει η απόκριση του συστήματος στο πεδίο των χρόνων από τη στιγμή  $t=0$  κι έπειτα (και θεωρώντας  $y(0)=0$ ) η οποία θα δίδεται από τη σχέση<sup>[4],[7],[8]</sup>:

$$y(t) = Ak(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.28)$$



Η έκφραση αυτή ουσιαστικά περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως στο οποίο μια βηματική είσοδος τιμής  $A$  εφαρμόστηκε την χρονική στιγμή  $t=0$ . Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζει εκθετική αύξηση και διαγραμματικά φαίνεται στη γραφική παράσταση της απόκρισης συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15 Διαγραμματικά η συμπεριφορά ενός συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως σε βηματική είσοδο  $A$ <sup>[7]</sup>

Στη παραπάνω γραφική παράσταση, με τη βοήθεια της συνάρτησης (2.28) που την περιγράφει, παρατηρείται ότι για  $t=0$  τότε  $y(0)=0$  και για  $t \rightarrow \infty$  προκύπτει  $y_{\infty}=kA$  η οποία και θα είναι η νέα τιμή εξόδου του συστήματος, όταν αυτό ισορροπήσει. Στο ενδιάμεσο, παρατηρείται ότι για  $t=\tau$  τότε  $y(\tau)=0,632y_{\infty}$ , για  $t=2\tau$  τότε  $y(2\tau)=0,865y_{\infty}$ , για  $t=3\tau$  τότε  $y(3\tau)=0,950y_{\infty}$ , για  $t=4\tau$  τότε  $y(4\tau)=0,982y_{\infty}$ , κ.ο.κ. (Πίνακας 2.3).

$t/\tau$	$1 - e^{-t/\tau}$	Value	Comment
0	$1 - e^0 =$	0	
0.1	$1 - e^{-0.1} =$	0.095	
0.5	$1 - e^{-0.5} =$	0.393	
1	$1 - e^{-1} =$	0.632	63% of change is reached after time $t = \tau$
2	$1 - e^{-2} =$	0.865	
3	$1 - e^{-3} =$	0.950	
4	$1 - e^{-4} =$	0.982	98% of change is reached after time $t = 4\tau$
5	$1 - e^{-5} =$	0.993	
$\infty$	$1 - e^{-\infty} =$	1	

Πίνακας 2.3 Η απόκριση του συστήματος για διάφορες τιμές της χρονικής σταθεράς  $\tau$



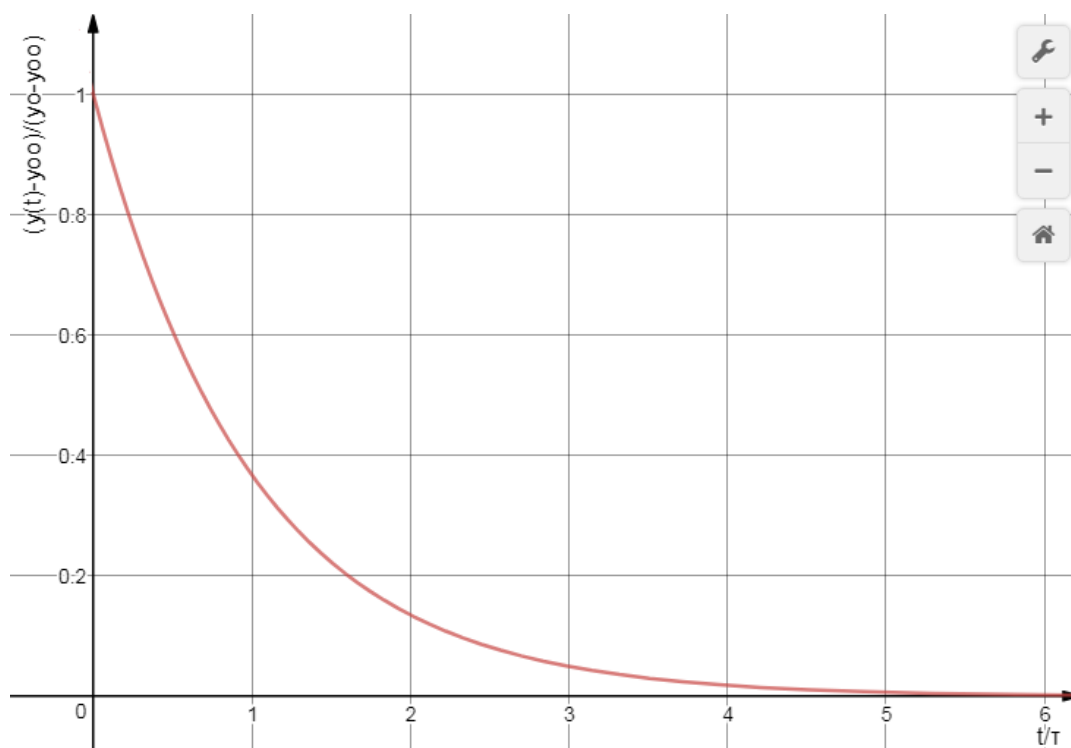


Από τους παραπάνω υπολογισμούς μπορεί κανείς να αντιληφθεί τη μεγάλη αξία που έχει η γνώση της τιμής της χρονικής σταθεράς  $\tau$  για την εύρεση του χρόνου ο οποίος απαιτείται ώστε ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως να φτάσει στη νέα τιμή εξόδου  $y_{\infty}$  σε σταθερή κατάσταση μετά από βηματική είσοδο σε αυτό.

Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης του ίδιου συστήματος είναι η μετατροπή αυτής της εκθετικής αύξησης του συστήματος σε συνάρτηση εκθετικής μείωσης. Σ' αυτή, ουσιαστικά μετράται το πόσο απέχει το σύστημα κάθε φορά από τη νέα τιμή ισορροπίας  $(y(t)-y_{\infty})$ , αδιαστατοποιώντας ως προς την ολική διαφορά της αρχικής απόκρισης του συστήματος με την τιμή αυτού στη νέα κατάσταση ισορροπίας μετά τη βηματική είσοδο  $(y_0-y_{\infty})$ . Αυτό μαθηματικά φαίνεται στην παρακάτω σχέση<sup>[7],[8]</sup>:

$$\frac{y(t)-y_{\infty}}{y_0-y_{\infty}}=e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (2.29)$$

Η γραφική παράσταση του πρώτου όρου της σχέσης (2.29) σε συνάρτηση με το χρόνο θα είναι μια συνάρτηση εκθετικής μείωσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 Το διάγραμμα του  $\frac{y(t)-y_{\infty}}{y_0-y_{\infty}}$  σε συνάρτηση με τον χρόνο

Μέσα απ' αυτή την έκφραση του συστήματος εξάγεται ουσιαστικά μια ποιοτική και ποσοτική ένδειξη του κατά πόσο η απόκριση του συστήματος απέχει από την τελική, σε εξέλιξη με τον χρόνο κι ιδιαίτερα τον λόγο  $\frac{t}{\tau}$ . Η σημασία της χρονικής σταθεράς για το σύστημα, όπως αυτή εξηγήθηκε προηγουμένως, είναι εμφανής και σ' αυτή τη διαγραμματική μορφή.

### 2.3.3 Απόκριση συστημάτων 1<sup>ης</sup> τάξεως σε ημιτονοειδή είσοδο

Η μελέτη ενός συστήματος υπό συνεχώς μεταβαλλόμενη είσοδο, αλλά με σταθερά χαρακτηριστικά σήματος διέγερσης, γίνεται συνήθως με τη χρήση της ημιτονοειδούς συνάρτησης εισόδου.

Αυτό γίνεται, διότι όλα τα πολύπλοκα σήματα εισόδου, τα οποία όμως είναι επαναλαμβανόμενα, μπορούν να αναλυθούν στο άθροισμα ενός συνόλου ημιτονοειδών σημάτων (μέσω μετασχηματισμού *Fourier*). Συνεπώς, η μελέτη της απόκρισης μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης εισόδου είναι μεγάλης αξίας για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος υπό μεταβαλλόμενη κι επαναλαμβανόμενη είσοδο.

Στη γενική της μορφή, όπου  $A$  το πλάτος του σήματος διέγερσης και  $\omega$  η συχνότητα αυτού, η ημιτονοειδής συνάρτηση διέγερσης θα έχει την μορφή<sup>[4],[11]</sup>:

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (2.30)$$

Ο μετασχηματισμός *Laplace* της μεταβαλλόμενης αυτής διέγερσης στο πεδίο των συχνοτήτων είναι:

$$X(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (2.31)$$

οπότε με χρήση των σχέσεων (2.24) και (2.31) προκύπτει η απόκριση του συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων<sup>[4]</sup>:

$$Y(s) = G(s) X(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{Ak}{\tau} \frac{\omega}{(s^2 + \omega^2) \left( s + \frac{1}{\tau} \right)} \quad (2.32)$$

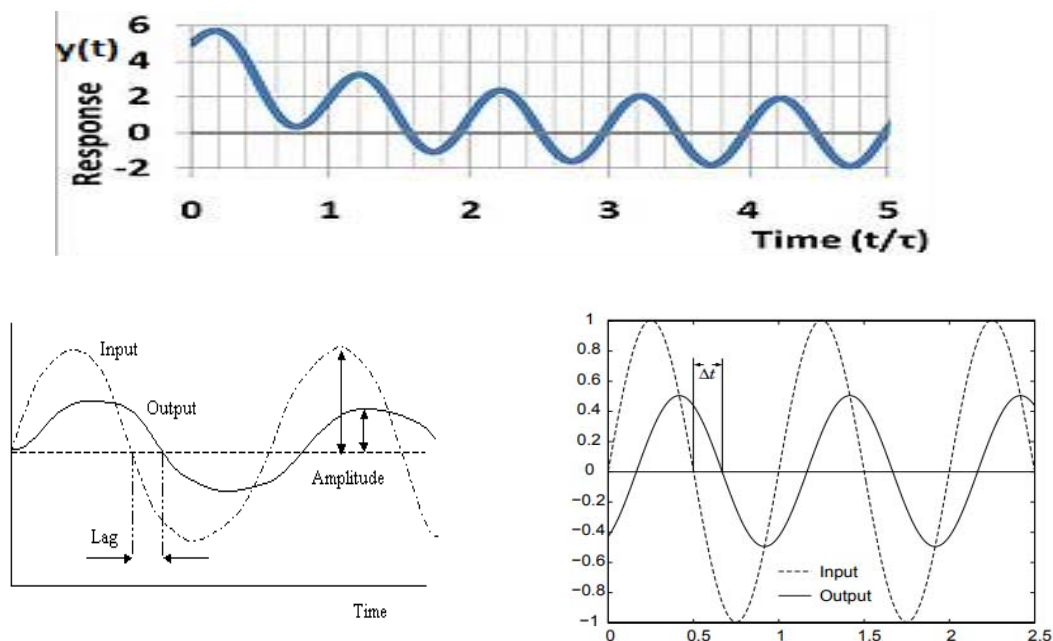
η οποία έπειτα από πράξεις και με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού *Laplace* δίνει την τελική απόκριση του συστήματος στο πεδίο των χρόνων και έχει την μορφή:

$$y(t) = \frac{Ak\omega e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau^2\omega^2 + 1} + \frac{Ak}{\sqrt{(\tau^2\omega^2 + 1)}} \sin(\omega t + \Phi) \quad (2.33)$$

$$\text{όπου}^{[4],[11]} \quad \Phi = \tan^{-1}(-\omega\tau) \quad (2.34)$$

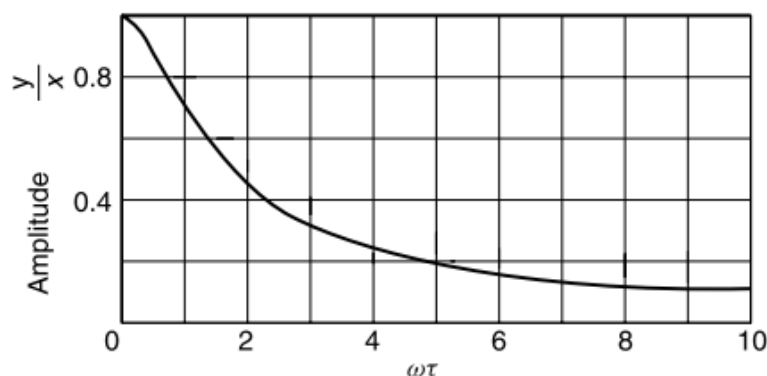
Παρατηρείται ότι η απόκριση αυτή του συστήματος χωρίζεται σε δύο όρους. Ο πρώτος ονομάζεται *μεταβατικός όρος* κι αποτελεί έναν μικρής χρονικής διάρκειας μειούμενο όρο στο σύστημα ο οποίος υπάρχει λόγω της μεταβατικής κατάστασης<sup>[4]</sup>. Προφανώς, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ο όρος αυτός πλησιάζει το μηδέν και πλέον μόνο ο δεύτερος όρος (γνωστός και ως *απόκριση συχνότητας*) ορίζει την απόκριση του συστήματος η οποία αποτελεί πλέον ένα σταθερό σήμα με εύρος  $\frac{Ak}{\sqrt{(\tau^2\omega^2 + 1)}}$ , συχνότητα  $\omega$  και διαφορά φάσης σε σχέση με το σήμα εισόδου ίση με  $\Phi$ <sup>[11]</sup>.

Είναι εμφανές από την παρουσία του μεταβατικού όρου ότι ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως δεν θα αποκριθεί αμέσως στο ημιτονοειδές σήμα εισόδου αλλά θα απαιτηθεί κάποιος χρόνος εκθετικής συμπεριφοράς του συστήματος μέχρι ο μεταβατικός όρος να μηδενιστεί και τελικά να υπερισχύσει ο σταθερός ημιτονοειδής όρος<sup>[4]</sup>. Η απόκριση του συστήματος τόσο κατά τη μεταβατική όσο και κατά τη σταθερή κατάσταση μπορούν να παρατηρηθούν στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.17).



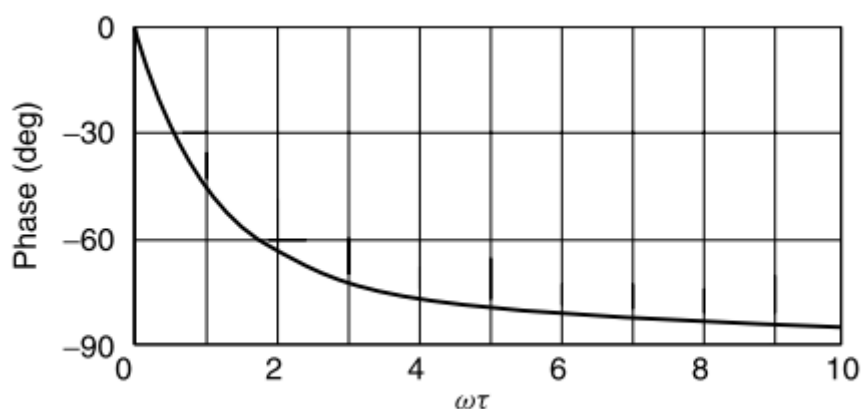
Σχήμα 2.17 Η απόκριση του συστήματος για μεταβατική & σταθερή κατάσταση<sup>[9],[10],[11]</sup>

Επιπρόσθετα, από την μελέτη της σχέσης (2.33) μπορούμε να διαπιστώσουμε την μεγάλη εξάρτηση του πλάτους του σήματος απόκρισης  $\frac{Ak}{\sqrt{(\tau^2\omega^2+1)}}$  τόσο από την χρονική σταθερά  $\tau$  του συστήματος όσο κι από την συχνότητα του σήματος διέγερσης (άρα και τη συχνότητα του σήματος απόκρισης αφού είναι ίδιες). Μάλιστα, όσο αυξάνεται ένα εκ των δύο μεγεθών το πλάτος του αποκρινόμενου σήματος μειώνεται όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (Σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.18 Διαγραμματική απεικόνιση της εξάρτησης του πλάτους απόκρισης από το  $\omega\tau$  <sup>[4]</sup>

Από την σχέση (2.34) μπορούμε να συμπεράνουμε και την εξάρτηση της φάσης της απόκρισης από τα  $\omega$  και  $\tau$ . Εδώ παρατηρείται αύξηση της διαφοράς φάσης των σημάτων εισόδου– εξόδου όσο αυξάνεται το  $\omega\cdot\tau$ , όπως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 2.19).

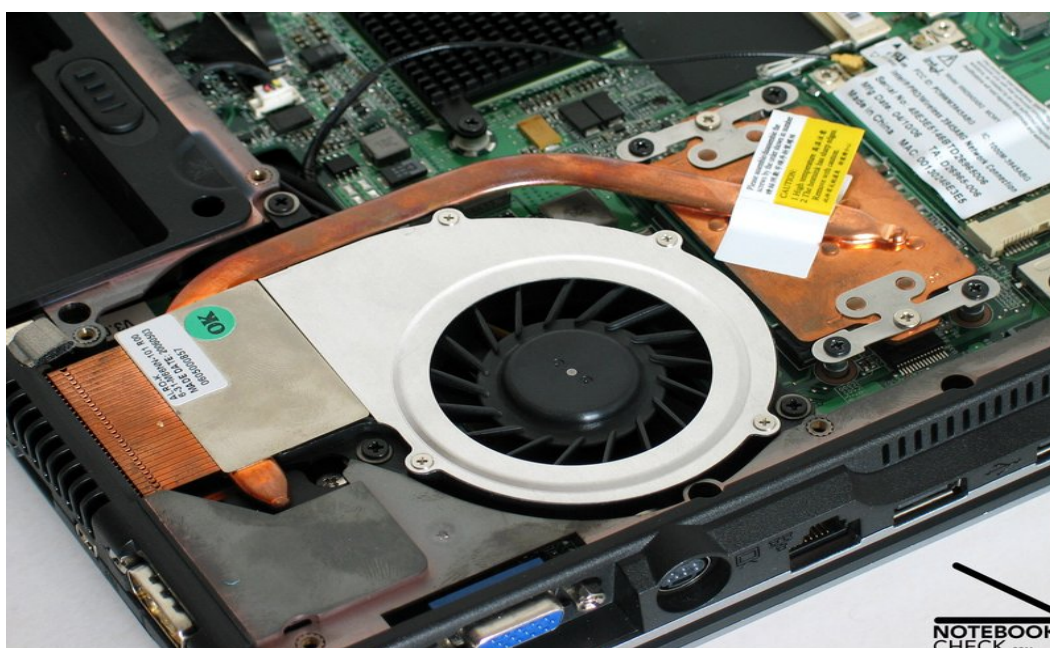


Σχήμα 2.19 Διαγραμματική απεικόνιση της εξάρτησης της φάσης απόκρισης από το  $\omega\tau$  <sup>[4]</sup>

## 2.4 Heat Pipes

### 2.4.1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά των *heat pipes*

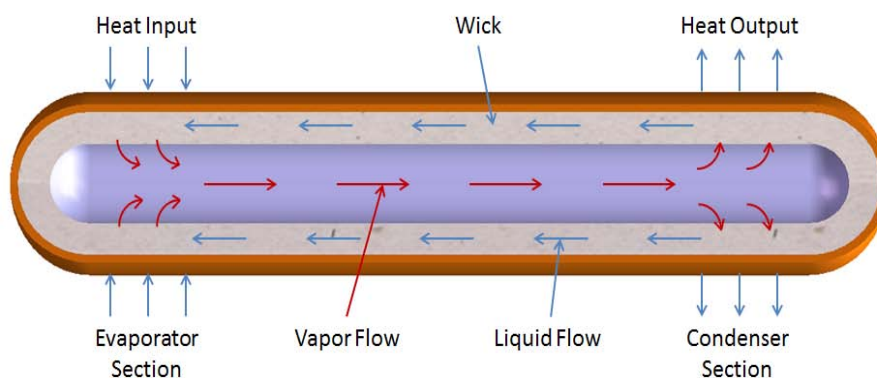
Ένας αγωγός θερμότητας (*heat pipe*) είναι ουσιαστικά μια συσκευή μεταφοράς θερμότητας που συνδυάζει τις αρχές μετάδοσης θερμότητας κι αλλαγής φάσεων ενός στοιχείου ώστε να επιτύχει την αποτελεσματική κι αποδοτική μεταφορά θερμότητας μεταξύ δυο επιφανειών. Τα *heat pipes* λόγω του τρόπου λειτουργίας τους αποδίδουν πολύ υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας (από  $5000 \frac{W}{m \cdot K}$  έως  $200000 \frac{W}{m \cdot K}$ ) έναντι αμιγώς θερμικά αγωγίμων υλικών, όπως για παράδειγμα ο χαλκός ( $400 \frac{W}{m \cdot K}$ )<sup>[12]</sup>, κάτι το οποίο αιτιολογεί και την εκτεταμένη χρήση τους σε πολλές εφαρμογές ψύξης (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Ένας αγωγός θερμότητας στο εσωτερικό ενός *laptop*<sup>[14]</sup>

Επίσης, όντας παθητικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας χαμηλού βάρους τα *heat pipes* έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, μηδενικό κόστος λειτουργίας, μηδενικές ανάγκες συντήρησης, αξιόπιστη λειτουργία, μη κινούμενα μέρη και ικανότητα μεταφοράς της θερμότητας ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις χάρη στην απλότητα του τρόπου κατασκευής και λειτουργίας τους.

Ένα *heat pipe* συνήθως χρησιμοποιεί την αλλαγή φάσης (αέριο- υγρό) ενός εργαζόμενου μέσου και τη μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας που αυτή η αλλαγή φάσης απαιτεί για να μεταφέρει θερμότητα από μια πηγή (π.χ. επεξεργαστής Η/Υ) στο περιβάλλον. Το *heat pipe* αποτελεί μια κλειστή μεταλλική κατασκευή (π.χ. χαλκός) σωληνωτής δομής η οποία εσωτερικά είναι επενδυμένη με κάποιας μορφής πορώδη δομή η οποία ονομάζεται *φιτίλι* (*wick*) και στην οποία κινείται η υγρή φάση. Μέσα στη σωληνωτή δομή και σε κορεσμένη κατάσταση για τις απαιτούμενες θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκεται το εργαζόμενο μέσο (π.χ. το νερό) (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Η εσωτερική αρχιτεκτονική δομή του αγωγού θερμότητας<sup>[15]</sup>

Θερμότητα εισέρχεται από το ένα άκρο της σωληνωτής δομής το οποίο ονομάζεται *εξαερωτήρας* (*evaporator*) και βρίσκεται ενωμένο με το εξάρτημα που επιθυμούμε να ψύξουμε. Η θερμότητα εισέρχεται μέσα από τα αγωγίμα τοιχώματα της κατασκευής και προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο το οποίο βρίσκεται σε υγρή μορφή στο φιτίλι. Προσλαμβάνοντας αυτή τη θερμότητα το υγρό εξαερώνεται και μετατρέπεται σε αέριο αυξάνοντας την τοπική πίεση της αέριας κατάστασης και προκαλώντας μεταφορά αέριας φάσης από τον εξαερωτήρα στο άλλο άκρο του σωληνωτού που ονομάζεται *συμπυκνωτής* (*condenser*). Ταυτόχρονα όμως, λόγω της δημιουργίας κενού στο φιτίλι από την εξαέρωση υγρού προκαλείται και δημιουργία τριχοειδών δυνάμεων οι οποίες έχουν την τάση να τραβήξουν υγρό προς τον εξαερωτήρα. Η αέρια φάση κινείται στο αδιαβατικό κομμάτι του σωληνωτού μέχρι να φτάσει, όπως προαναφέρθηκε, στον συμπυκνωτή<sup>[13]</sup>.

Εκεί το αέριο ερχόμενο σε επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα του συμπυκνωτή, συμπυκνώνεται στην υγρή μορφή αποδίδοντας στα τοιχώματα του σωληνωτού και κατ' επέκταση στο περιβάλλον την λανθάνουσα θερμότητα που είχε απορροφήσει από τον εξαερωτήρα. Στη συνέχεια, η υγρή φάση απορροφάται από το φιτίλι και κινείται προς τον εξαερωτήρα υπό την επίδραση τριχοειδών δυνάμεων που δημιουργούνται με τον μηχανισμό που εξηγήθηκε προηγουμένως, ολοκληρώνοντας





τον κύκλο. Στον συμπυκνωτή η αποδιδόμενη ενέργεια θερμαίνει τα τοιχώματα του σωληνωτού τα οποία όμως αποδίδουν αυτή την θερμότητα στο περιβάλλον με την χρήση πτερυγίων ψύξης κι εξαναγκασμένης συναγωγής (π.χ. με τη χρήση ανεμιστήρα).

Η επιλογή του κατάλληλου εργαζομένου μέσου καθώς και η ποσότητα αυτού που θα χρησιμοποιηθεί στο κλειστό σύστημα του *heat pipe* έχουν άμεση σχέση με την απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας του. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό απ' το γεγονός ότι για να είναι εφικτή η διεργασία υγροποίησης-συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου θα πρέπει κάθε στιγμή μέσα στον αγωγό θερμότητας να υπάρχει τόσο υγρή όσο κι αέρια φάση. Έτσι, για το κάθε εργαζόμενο μέσο υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών κάτω από το οποίο το εργαζόμενο μέσο είναι πολύ κρύο και δε μπορεί να μετατραπεί σε αέριο και πάνω από το οποίο το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία κι έτσι παραμένει μόνιμα στην αέρια κατάσταση<sup>[13]</sup>.

Σε κάθε περίπτωση δεν θα πρέπει ο κύκλος του εργαζόμενου μέσου, άρα και η επωφελής χρήση της λανθάνουσας θερμότητας μέσου του κύκλου αυτού, να εξαλείφεται μειώνοντας δραματικά τον συντελεστή αγωγιμότητας του *heat pipe*. Γι' αυτό για το κάθε εργαζόμενο μέσο δημιουργούνται πίνακες, όπως φαίνεται και παρακάτω (Πίνακας 2.4) με τα επιτρεπόμενα εύρη θερμοκρασίας λειτουργίας του *heat pipe* τα οποία συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή.

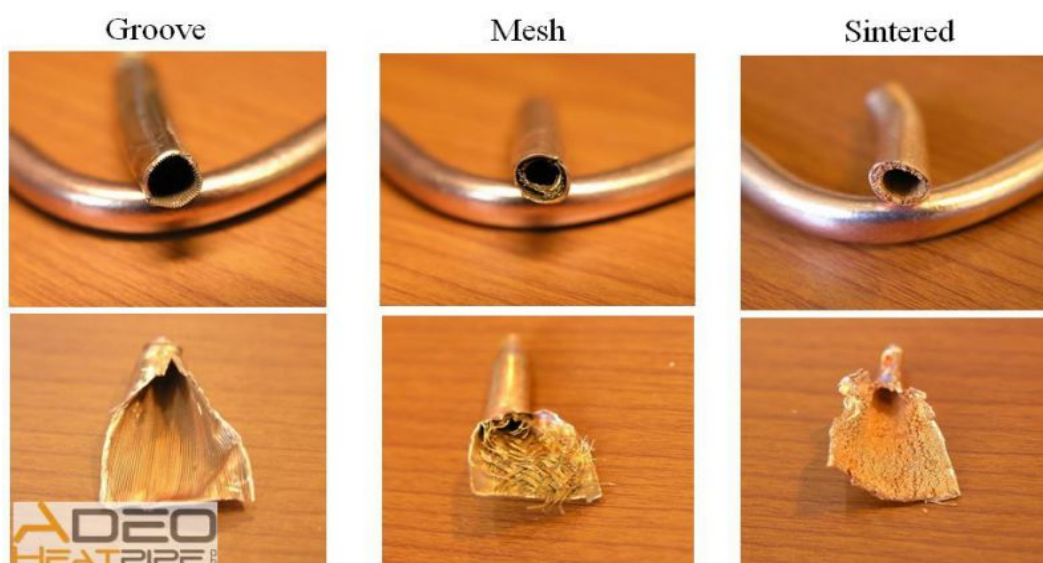
Heat Pipe Working Fluid	Operating Temperature Range (°C)	Heat Pipe Shell Material
<b>Low Temperature or Cryogenic Heat Pipe Working Fluids</b>		
Carbon Dioxide	-50 to 30	Aluminum, Stainless Steel, Titanium
Helium	-271 to -269	Stainless Steel, Titanium
Hydrogen	-260 to -230	Stainless Steel
Methane	-180 to -100	Stainless Steel
Neon	-240 to -230	Stainless Steel
Nitrogen	-200 to -160	Stainless Steel
Oxygen	-210 to -130	Aluminum, Titanium
<b>Mid Range Heat Pipe Working Fluids</b>		
Acetone	-48 to 125	Aluminum, Stainless Steel
Ammonia	-75 to 125	Aluminum, Stainless Steel
Ethane	-150 to 25	Aluminum
Methanol	-75 to 120	Copper, Stainless Steel
Methylamine	-90 to 125	Aluminum
Pentane	-125 to 125	Aluminum, Stainless Steel
Propylene	-150 to 60	Aluminum, Stainless Steel
Water	1 to 325	Copper, Monel, Nickel, Titanium
<b>High Temperature Heat Pipe Fluids</b>		
Cesium	350 to 925	Stainless Steel, Inconel, Haynes
NaK	425 to 825	Stainless Steel, Inconel, Haynes
Potassium	400 to 1,025	Stainless Steel, Inconel, Haynes
Sodium	500 to 1,225	Stainless Steel, Inconel, Haynes
Lithium	925 to 1,825	Tungsten, Niobium
Silver	1,625 to 2,025	Tungsten, Molybdenum

Πίνακας 2.4 Τα επιτρεπόμενα εύρη θερμοκρασίας του *heat pipe* για διάφορα εργαζόμενα μέσα<sup>[13]</sup>



Αφού επιλεγεί το κατάλληλο εργαζόμενο μέσο, έπειτα είναι απαραίτητο να επιλεγεί κι ένα υλικό κατασκευής για το σωληνωτό όσο και για το φιτίλι του *heat pipe* το οποίο θα είναι συμβατό με το εργαζόμενο μέσο. Αυτό σημαίνει ότι το εργαζόμενο μέσο και το υλικό κατασκευής δεν θα πρέπει να είναι χημικά ενεργά κατ' οποιονδήποτε τρόπο μεταξύ τους κι επίσης το υλικό του *heat pipe* θα πρέπει να προσεχθεί ώστε να μην δημιουργεί το φαινόμενο μη συμπύκνωσης αερίου όπως παρατηρείται για παράδειγμα στο σύστημα νερού- αλουμινίου. Όλα αυτά βέβαια, πραγματοποιούνται μέσα από την υλοποίηση πολλών πειραματικών διαδικασιών μέσω των οποίων προκύπτουν πίνακες συμβατών υλικών εργαζόμενου μέσου- *heat pipe*, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα 2.4.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης κι η επιλεγόμενη δομή του φιτιλιού, αφού αυτό δημιουργεί και συντηρεί ουσιαστικά τον μηχανισμό μεταφοράς της υγρής φάσης από τον συμπυκνωτή πίσω στον εξαερωτήρα, μέσω της ανάπτυξης τριχοειδών δυνάμεων. Το φιτίλι βρίσκεται πάντα στην εσωτερική πλευρά του σωληνωτού κι ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής μπορεί να είναι από διάφορα υλικά κι επίσης να σχηματίζει διάφορες δομές. Οι πιο γνωστές από αυτές τις δομές περιλαμβάνουν τις αξονικές αυλακώσεις (*axially grooves*), τη δομή συρματο-πλέγματος (*screen wire-mesh*) και τη δομή συσσωματώματος σκόνης μετάλλου (*sintered powder metal*). Η τελευταία αποτελεί την πιο διαδεδομένη σε συστήματα ψύξης υπολογιστών ενώ η πρώτη χρησιμοποιείται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές. Παραδείγματα των τριών κυρίων δομών φαίνονται και στη παρακάτω εικόνα<sup>[16]</sup> (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Οι πιο διαδεδομένες δομές φιτιλιού που χρησιμοποιούνται στα *heat pipes*

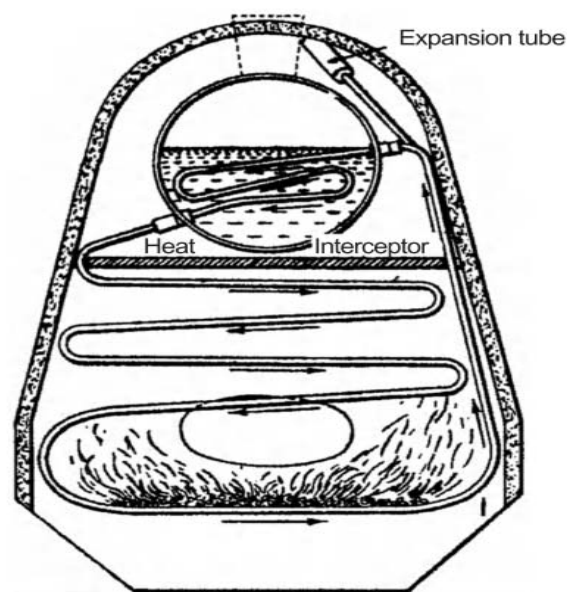


Η δομή του φιτιλιού είναι μεγάλης σημασίας σε εφαρμογές όπου η βαρύτητα αντιστασεται στις δημιουργούμενες τριχοειδείς δυνάμεις. Αποτελεσματικότερη σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η δομή συσσωματώματος σκόνης μετάλλων.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο για τα φιτίλια όσο και για τα *heat pipes* υπάρχουν πολλές γεωμετρίες και σχέδια τα οποία επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα και τη ποσότητα θερμότητας που μεταφέρει ο αγωγός θερμότητας αλλά σε κάθε περίπτωση η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με αυτήν που επεξηγήθηκε.

#### **2.4.2 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των *heat pipes***<sup>[12],[17],[18]</sup>

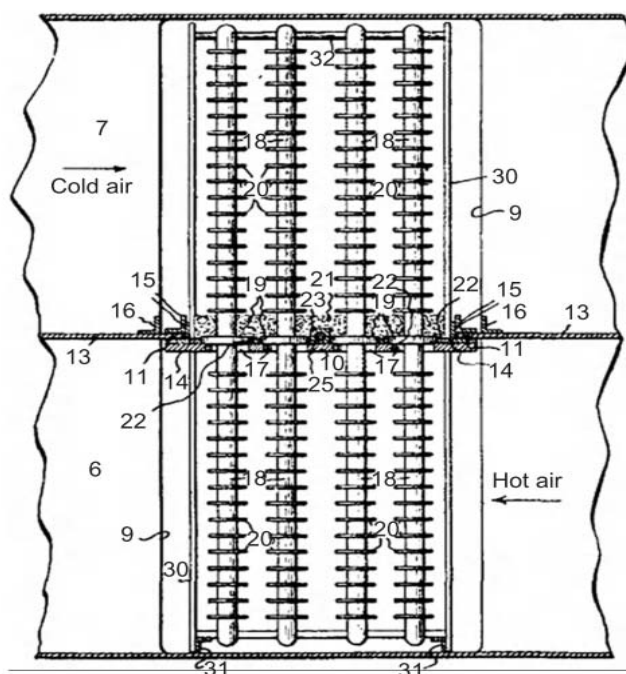
Η ιστορία των *heat pipes* μπορούμε να πούμε ότι ξεκινά ιστορικά με τον *Angier March AM Perkins* ο οποίος το 1831 πατένταρε τον ερμητικά κλειστό σωλήνα βρασμού γνωστό και ως *Perkins Tube*. Ο *AM Perkins* πειραματίστηκε με την χρησιμοποίηση ενός εργαζόμενου μέσου σ' ένα κλειστό σύστημα αλλά με τη χρήση μιας μόνο φάσης του μέσου υπό υψηλή πίεση. Το 1936 ο *Jacob Perkins*, απόγονος του *AM Perkins* πατένταρε μια άλλη εκδοχή του *Perkins Tube* στην οποία ένας μακρύς στριφτός σωλήνας περνούσε από ένα εξαερωτήρα και στη συνέχεια από έναν συμπυκνωτή στον οποίο όμως η επιστροφή της υγρής φάσης γινόταν μέσω βαρυτικών δυνάμεων (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4 Ο κλειστός σωλήνας βρασμού γνωστός ως *Perkins Tube*<sup>[17]</sup>

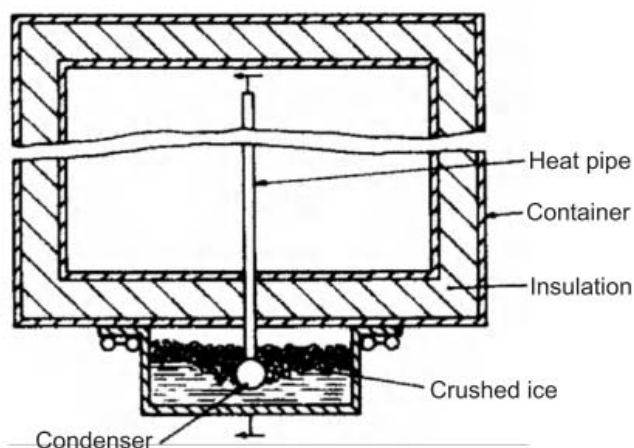


Το 1942 ο *F.W. Gay* επινόησε αυτό που σήμερα είναι γνωστό σαν *gas-to-gas heat pipe heat exchanger* στο οποίο χρησιμοποίησε μια διαχωριστική πλάκα χωρίζοντας το άκρο του σωληνωτού στο οποίο γινόταν η εξαέρωση από αυτό στο οποίο γινόταν η συμπύκνωση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.5. Ο ίδιος στην πατέντα του συμπεριέλαβε και την τοποθέτηση πτερυγίων για την καλύτερη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και σωλήνα- *heat pipe*. Επίσης, περιέλαβε και πρόταση για χρησιμοποίηση διάφορων εργαζόμενων μέσων, όπως υδράργυρο και μεθανόλη ανάλογα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας της κατασκευής.



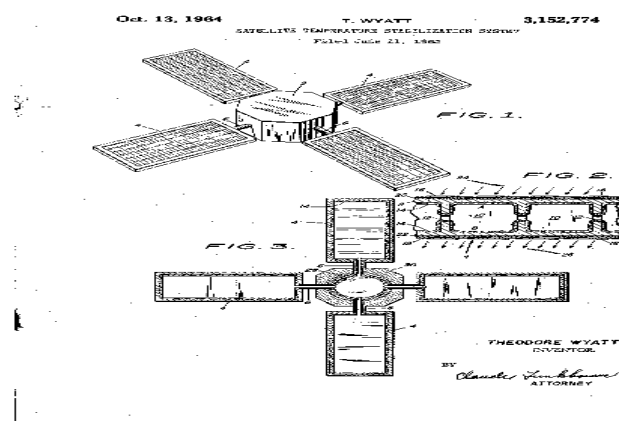
Εικόνα 2.5 Η πατέντα του *F.W. Gay*, το λεγόμενο *gas-to-gas heat pipe heat exchanger*<sup>[17]</sup>

Το 1944 η πρώτη μορφή ενός πιο σύγχρονου μοντέλου *heat pipe* προτάθηκε από τον *R.S. Gaugler* της *General Motors Corporation*. Η πατέντα του περιελάμβανε για πρώτη φορά έναν ελαφριάς κατασκευής αγωγό θερμότητας, με χρήση φτιλίου για την επιστροφή της υγρής φάσης, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε ψυκτικές εφαρμογές. Η πατέντα του (εικόνα 2.6) δεν χρησιμοποιήθηκε τελικά εκείνη την εποχή γιατί δοθήκαν άλλες λύσεις κι έτσι η ανάπτυξη της εφαρμογής αναβλήθηκε.



Εικόνα 2.6 Η πατέντα του R.S. Gaugler με τη χρησιμοποίηση πρώτη φορά του φιτιλιού<sup>[17]</sup>

Μετά από μια περίοδο αδράνειας, το θέμα των *heat pipes* επανήλθε στο προσκήνιο κατά την ανάπτυξη του διαστημικού προγράμματος των ΗΠΑ. Η εφαρμογή τους πρωτοαναφέρθηκε από τον L. Trefethen το 1962, ακολουθούμενη από μία πατέντα με εφαρμογή τον θερμικό έλεγχο δορυφόρου από τον Theodore Wyatt το 1963 (US3152774A).



Εικόνα 2.7 Η χρήση των *heat pipes* στην αεροδιαστημική τη δεκαετία του '70<sup>[19]</sup>

Τον Δεκέμβριο του 1963 ο George M Grover μαζί με τους συνεργάτες του στο Los Alamos Scientific Laboratory σχεδίασαν, κατασκεύασαν και πειραματιστήκαν με πολλά πρωτότυπα που στηριζόταν στη τεχνολογία των *heat pipes*. Μάλιστα, ο Grover ήταν αυτός που επινόησε το όνομα *heat pipes* γι' αυτές τις κατασκευές μεταφοράς θερμότητας και πατένταρε το σχέδιο του (US3229759A).

Jan. 18, 1966  
 G. M. GROVER  
 3,229,759  
 EVAPORATION-CONDENSATION HEAT TRANSFER DEVICE  
 Filed Dec. 2, 1964  
 2 Sheets-Sheet 1

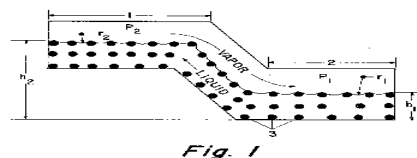


Fig. 1

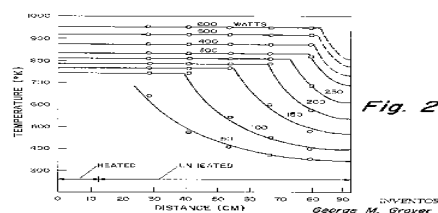
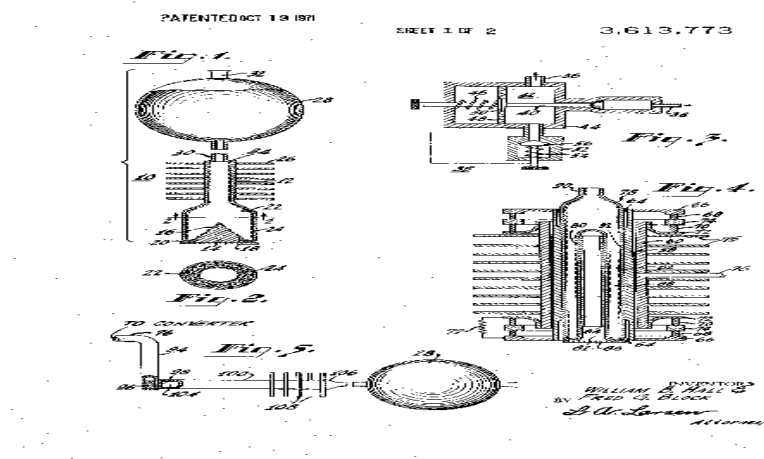


Fig. 2

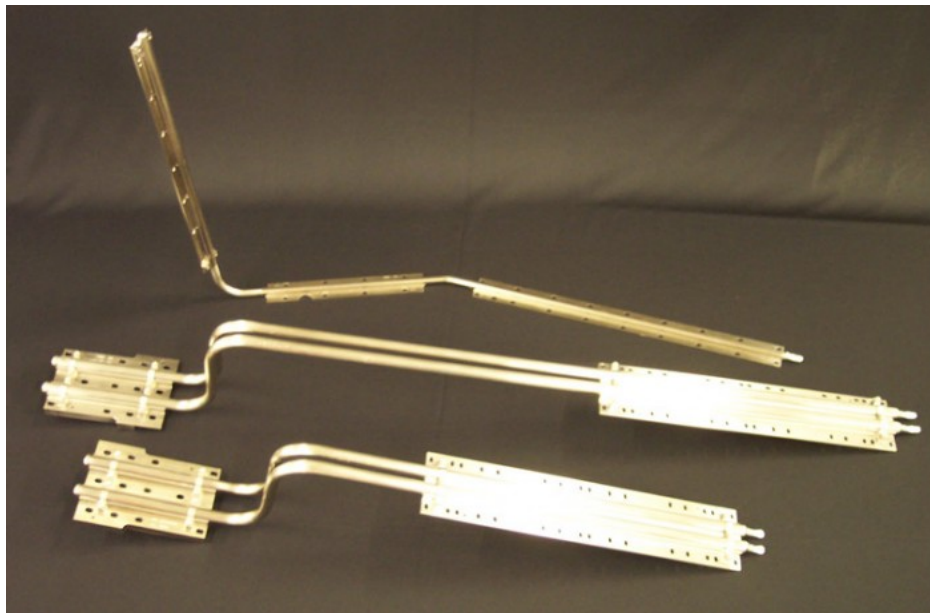
Εικόνα 2.8 Το σχέδιο του Grover με τον πατενταρισμένο αγωγό θερμότητας<sup>[20]</sup>

Ο Grover στα πρώτα του *heat pipes* χρησιμοποιούσε νερό σαν εργαζόμενο μέσο και στην συνέχεια ακολούθησαν πειράματα με υγρό νάτριο για θερμοκρασίες λειτουργίας μεταξύ 1100 K και 1500 K. Μετά τη μεγάλη επιτυχία που είχαν τα πειράματα του Grover ακολούθησε μεγάλη ανάπτυξη στο αντικείμενο. Παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη *heat pipes* μεταβλητής αγωγιμότητας με τη χρήση μη συμπυκνωμένου αερίου (για το οποίο έγινε αναφορά πρώτη φορά από τον Grover) από τους William B. Hall και Fred G. Block (US3613773) στο RCA το 1964.



Εικόνα 2.9 Το σχέδιο των William B. Hall και Fred G. Block για *heat pipes* μεταβλητής αγωγιμότητας<sup>[21]</sup>

Επιπρόσθετα, η πατέντα του *Grover* αξιοποιήθηκε από την *NASA* για τη χρησιμοποίηση σε διαστημικές εφαρμογές λόγω του εύρους των εφαρμογών και της αξιοπιστίας που τα *heat pipes* είχαν. Παράδειγμα αποτελεί το 1967 η πρώτη επίδειξη *heat pipes* “μηδενικής βαρύτητας” από μια ομάδα μηχανικών από το *Los Alamos Scientific Laboratory*. Η πρώτη δοκιμή σε διαστημική πτήση ήταν σε δορυφόρο για την θερμική εξισορρόπηση αυτού και είχε μεγάλη επιτυχία. Έκτοτε, τα περισσότερα διαστημικά οχήματα μέχρι και σήμερα στηρίζοντα σε *heat pipes* για τον έλεγχο της θερμοκρασίας είτε συγκεκριμένων εξαρτημάτων ή ακόμη κι ολόκληρης της κατασκευής.



Εικόνα 2.10 *Heat Pipes* “μηδενικής βαρύτητας” στην υπηρεσία δορυφόρων στο διάστημα<sup>[22]</sup>

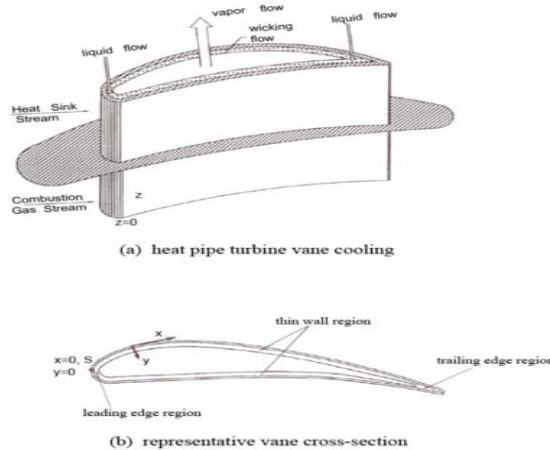
Το 1966 αναπτύχθηκε το πρώτο κρυογενικό *heat pipe* από το *Haskin Air Force Flight Dynamic Laboratory* στην αεροπορική βάση *Wright- Petterson*.

Σε δημοσιεύσεις των *Feldman*, *Eastman* και *Katzoff* το 1967 και 1968 αναφέρεται η χρήση των αγωγών θερμότητας για ένα εύρος εφαρμογών όπως η χρήση σε συστήματα ψύξης κινητήρων αλλά και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Το ίδιο έτος (1968) το *RCA* ανέπτυξε ένα *heat pipe* για την ψύξη τρανζίστορ πομπών αεροσκαφών.

Το 1969 εισήχθη για πρώτη φορά το περιστροφικό *heat pipe* για χρήση σε ψύξη πτερυγίων αεριοστροβίλων.



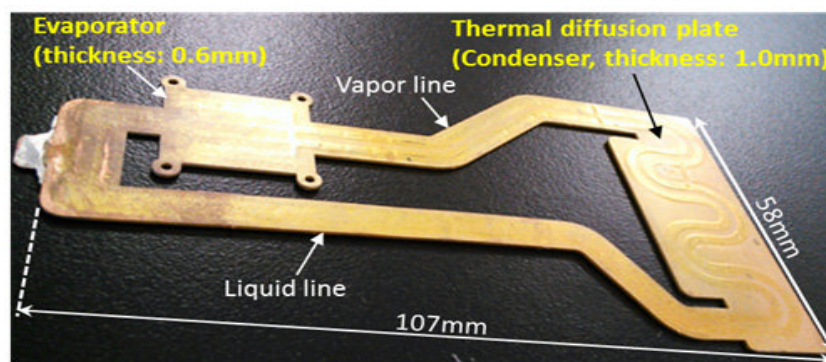


Εικόνα 2.11 Οι αγωγοί θερμότητας στα πτερύγια αεροστροβίλων<sup>[23]</sup>

Από το 1970 και μετά άρχισαν οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές αλλά μόνο από μεγάλες εταιρίες (λόγω του υψηλού κόστους), όπως η *IBM* για ψύξη εφαρμογών με θερμοκρασίες λειτουργίας μεταξύ  $175^{\circ}\text{F}$  και  $750^{\circ}\text{F}$ .

Από το 1980 και μετά η *Sony* ξεκίνησε να χρησιμοποιεί *heat pipes* σε κάποιες ηλεκτρονικές διατάξεις εμπορικών προϊόντων, αντικαθιστώντας εφαρμογές εξαναγκασμένης συναγωγής κι αύξησης της επιφάνειας με πτερύγια ψύξης.

Από το 1990 κι έπειτα, η συνεχώς αυξανόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας των μικροεπεξεργαστών (CPUs κλπ.) έκανε την χρήση των *heat pipes* για την ψύξη τους σχεδόν αναγκαία. Η ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας των αγωγών αυτών σε συνδυασμό με την απλότητα λειτουργίας και την αξιοπιστία δημιούργησε μεγάλη ζήτηση κι επιπλέον πειραματική ανάπτυξη. Αυτό μείωσε ακόμη το κόστος παραγωγής, αφού η παραγωγή του βιομηχανοποιήθηκε κι έτσι η εφαρμογή τους επεκτάθηκε ακόμα περισσότερο.



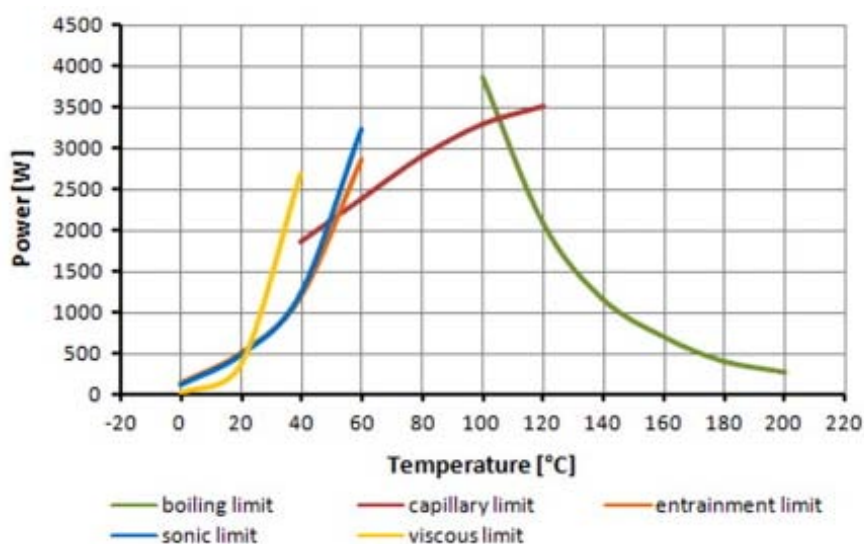
Εικόνα 2.12 Ένα είδος αγωγού θερμότητας για χρήση σε κινητά τηλέφωνα *smartphones*<sup>[24]</sup>



Πλέον όλα τα σύγχρονα ηλεκτρονικά μέσα, όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, *laptops*, *tablets* ακόμη και κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούν *heat pipes* για την ψύξη των επεξεργαστών τους, καρτών γραφικών κλπ. Ο πιο διαδεδομένος συνδυασμός υλικού-εργαζόμενου μέσου είναι αυτός του χαλκού- νερού.

### 2.4.3 Μαθηματικοί τύποι, μοντέλα και περιορισμοί

Ένα μαθηματικό μοντέλο για τα *heat pipes* μπορεί να δημιουργηθεί υπολογίζοντας τα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε αυτά και με βάση αυτά τα μοντέλα, τους περιορισμούς μετάδοσης θερμότητας που το καθένα δημιουργεί. Χρησιμοποιώντας αυτή την ανάλυση καθώς κι υπολογίζοντας τον κάθε περιορισμό ανεξάρτητα, η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση της μέσης θερμοκρασίας λειτουργίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για να προσδιοριστεί η ικανότητα μετάδοσης θερμότητας ενός *heat pipe* πρέπει να υπολογιστεί η μέση θερμοκρασία λειτουργίας του. Ταυτόχρονα όμως, η μέση θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνάρτηση της εισαγόμενης θερμότητας στο σύστημα. Άρα, είναι αντιληπτό ότι υπάρχει μια αμοιβαία εξάρτηση των δύο μεγεθών. Ένα τέτοιο παράδειγμα της εξάρτησης αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.20) όπου περιλαμβάνονται κι οι διάφοροι περιορισμοί οι οποίοι συνήθως αρχίζουν να εμφανίζονται σε ακραίες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.20 Διαγραμματική απεικόνιση της εξάρτησης της μέσης θερμοκρασίας λειτουργίας του *heat pipe* και της ισχύος εισόδου<sup>[25]</sup>

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ένα *heat pipe* υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς μετάδοσης της θερμότητας ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο, τη δομή του φιτιλιού, το μέγεθός του καθώς και τη θερμοκρασία λειτουργίας του.

### Περιορισμός λόγω τριχοειδών δυνάμεων (*Capillary Limitation*)

Ο περιορισμός αυτός συσχετίζεται με το βασικό φαινόμενο το οποίο δημιουργεί κι υποστηρίζει την κίνηση του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή τις τριχοειδείς δυνάμεις. Η μέγιστη τριχοειδής πίεση  $(\Delta P_c)_{max}$  θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα όλων των πτώσεων πίεσης μέσα στο *heat pipe*. Δηλαδή, θα πρέπει:

$$(\Delta P_c)_{max} \geq \Delta p_{tot} \quad (2.35)$$

Η απώλεια πιέσεων μέσα στον αγωγό θερμότητας μπορεί να χωριστεί ως η πτώση πίεσης λόγω τριβής τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση, η πτώση πίεσης λόγω εξωτερικών δυνάμεων, όπως για παράδειγμα η βαρυτική κι η πτώση πίεσης λόγω αλλαγής φάσης. Δηλαδή είναι:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_g + \Delta p_{ph} \quad (2.36)$$

Η πτώση πίεσης για αλλαγή φάσης όμως είναι σημαντική μόνο για πολύ υψηλούς ρυθμούς συμπύκνωσης ή εξαέρωσης κι εκτός από πολύ σπάνιες περιπτώσεις (π.χ. *heat pipe* με εργαζόμενο μέσο υγρό μέταλλο) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η πτώση της πίεσης λόγω τριβής στην υγρή φάση μπορεί να υπολογισθεί από την εμπειρική σχέση<sup>[26]</sup>:

$$\Delta P_l = \frac{\mu_l L_{eff} Q}{\rho_l K A_w h_{fg}} \quad (2.37)$$

όπου  $\mu_l$  το ιξώδες του ρευστού,  $L_{eff}$  το δραστικό μήκος του *heat pipe*,  $\rho_l$  η πυκνότητα του ρευστού,  $K$  η διαπερατότητα του φιτιλιού,  $A_w$  η επιφάνεια του φιτιλιού σε τομή και  $h_{fg}$  η θερμότητα εξαέρωσης του υγρού.

Η πτώση πίεσης λόγω τριβής στην αέρια φάση μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta P_v = \frac{16 \mu_v L_{eff} Q}{2 \left( \frac{D_v}{2} \right)^2 A_v \rho_v h_{fg}} \quad (2.38)$$



όπου  $\mu_v$  το ιξώδες της αέριας φάσης,  $L_{eff}$  το δραστικό μήκος του *heat pipe*,  $\rho_v$  η πυκνότητα του αερίου,  $D_v$  το μήκος της αέριας φάσης,  $A_v$  η επιφάνεια της διατομής της αέριας φάσης και  $h_{fg}$  η θερμότητα υγροποίησης του αερίου (που είναι ίδια με τη θερμότητα εξαέρωσης και ίση με την λανθάνουσα θερμότητα).

Η μέγιστη τριχοειδής πίεση που αναπτύσσεται μέσα στο φιλίλι μπορεί να δοθεί από την εξίσωση *Laplace – Young* κι αυτή είναι:

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r_{eff}} \cdot \cos \theta \quad (2.39)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία επαφής μεταξύ υγρού και της δομής του φιλιλίου (είναι ένα μέτρο της απορροφητικότητας του υγρού στη δομή του φιλιλίου και στην ιδανική περίπτωση  $\theta=0^\circ$ ),  $r_{eff}$  η δραστική ακτίνα των πόρων στο φιλίλι και  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του υγρού.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει η τριχοειδής πίεση να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα όλων των υπολοίπων πιέσεων μαζί. Αν αυτό δεν ισχύει, τότε εμφανίζεται περιορισμός λόγω τριχοειδούς πίεσης, δηλαδή η τριχοειδής πίεση δεν είναι αρκετή για να υπερνικήσει τις πτώσεις πιέσεων λόγω τριβής από την κίνηση του υγρού και του αερίου.

Για τα περισσότερα *heat pipes* λαμβάνοντας μόνο αυτό τον περιορισμό η μέγιστη μεταφορά θερμότητας λόγω τριχοειδούς πίεσης δίδεται από τη σχέση<sup>[26]</sup>:

$$\dot{Q}_c = \frac{\sigma_l \rho_l h_{fg}}{\mu_l} \cdot \frac{K A_w}{L_{eff}} \cdot \left( \frac{2}{r_{eff}} - \frac{\rho_l g L_{eff} \sin \varphi}{\sigma} \right) \quad (2.40)$$

όπου  $K$  η διαπερατότητα του φιλιλίου σε  $m^2$ ,  $A_w$  η επιφάνεια του φιλιλίου σε διατομή σε  $m^2$ ,  $\rho_l$  η πυκνότητα της υγρής φάσης σε  $\frac{Kg}{m^3}$ ,  $\mu_l$  το ιξώδες του ρευστού σε  $\frac{N \cdot s}{m^2}$ ,  $r_{eff}$  η δραστική ακτίνα των πόρων στο φιλίλι σε  $m$ ,  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του υγρού σε  $\frac{N}{m}$  και  $\varphi$  η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του *heat pipe* με την οριζόντια διεύθυνση και με θετικές τιμές όταν ο συμπυκνωτής βρίσκεται κάτω από τον εξαερωτήρα.

### Περιορισμός λόγω δυνάμεων ιξώδους (*Viscous Limitation*)

Ο περιορισμός αυτός εμφανίζεται συνήθως σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπου η πίεση κορεσμού της αέριας κατάστασης μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την πτώση πίεσης που απαιτείται για να κινηθεί η αέρια φάση. Αυτό οδηγεί σε ανεπαρκή κλίμακα πίεσης για την μεταφορά της αέριας φάσης αφού αυτή η χαμηλή πίεση μπορεί να εξισορροπείται από τις αντίθετες δυνάμεις ιξώδους του αερίου. Αυτό το όριο κάποιες φορές αναφέρεται κι ως *όριο ιξώδους* (*viscous limit*), εμφανίζεται σε θερμοκρασίες κοντά στο όριο τήξης του εργαζόμενου μέσου ή σε πολύ μακριά *heat pipes* και η μέγιστη θερμότητα μεταφοράς λόγω αυτού του ορίου δίδεται από τη σχέση<sup>[25]</sup>:

$$\dot{Q}_v = \frac{\pi \cdot r_v^4 \cdot l_v \rho_v P_v}{12 \cdot \mu_v l_{eff}} \quad (2.41)$$

όπου  $r_v$  η ακτίνα της διατομής της αέριας φάσης σε  $m$ ,  $l_v$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάερωσης σε  $\frac{J}{Kg}$ ,  $\mu_v$  το ιξώδες του αερίου στον εξαερωτήρα σε  $\frac{N \cdot s}{m^2}$ ,  $l_{eff}$  το δραστικό μήκος του *heat pipe* σε  $m$ ,  $P_v$  και  $\rho_v$  η πίεση σε  $Pa$  και η πυκνότητα σε  $\frac{Kg}{m^3}$  της αέριας φάσης στον εξαερωτήρα.

### Περιορισμός υψηλών ταχυτήτων ροής (*Sonic Limitation*)

Ο περιορισμός αυτός εμφανίζεται σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ατμών όπου η ροή μάζας στο *heat pipe* μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές ταχύτητες δημιουργώντας φαινόμενα συμπεστικής ροής λόγω αδράνειας και διακοπτόμενη ροή (*choked flow*). Εμφανίζεται σπάνια, κυρίως σε εργαζόμενα μέσα υγρών μετάλλων και σε *heat pipes* με πολύ μικρές διατομές της αέριας φάσης, ενώ δεν απαντάται στις συνήθεις εφαρμογές ψύξης ηλεκτρονικών συστημάτων. Σε αυτή την περίπτωση, το όριο μεταφοράς θερμότητα λόγω της εμφάνισης του φαινομένου θα δίδεται από τη σχέση<sup>[25]</sup>:

$$\dot{Q}_s = 0,474 \cdot A_v l_v \sqrt{\rho_v P_v} \quad (2.42)$$

όπου  $A_v$  η επιφάνεια της διατομής της αέριας φάσης σε  $m^2$ ,  $P_v$  και  $\rho_v$  η πίεση σε  $Pa$  και η πυκνότητα σε  $\frac{Kg}{m^3}$  της αέριας φάσης στην έξοδο του εξαερωτήρα.

### Περιορισμός λόγω παρασυρμένης ροής (*Entrainment Limitation*)

Η ροή της αέριας και υγρής φάσης σε ένα *heat pipe* έχουν πάντα αντίθετες κατευθύνσεις. Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται στην οριακή περίπτωση όπου οι αναπτυσσόμενες διατμητικές δυνάμεις λόγω της αντίθετης ροής των δύο φάσεων είναι τόσο μεγάλες που μπορεί να προκαλέσουν παράσυρση της υγρής φάσης προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τότε είναι δυνατή η δημιουργία κι η εισαγωγή σταγονιδίων στην αέρια φάση τα οποία θα κινούνται προς τον συμπυκνωτή αντίθετα στην κανονική φορά της υγρής φάσης. Αποτέλεσμα είναι η ιδιαίτερα μεγάλη μείωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας από το *heat pipe* η οποία θα δίδεται από τη σχέση<sup>[25]</sup>:

$$\dot{Q}_e = A_v \cdot l_v \cdot \sqrt{\frac{\rho_v \cdot \sigma_l}{2 \cdot r_{c,ave}}} \quad (2.43)$$

όπου  $\sigma_l$  η επιφανειακή τάση σε  $\frac{N}{m^2}$  και  $r_{c,ave}$  η μέση τριχοειδής ακτίνα του φτιλιού σε  $m$ . Σε πολλές εφαρμογές  $r_{c,ave}$  και  $r_{reff}$  είναι το ίδιο.

### Περιορισμός λόγω βρασμού (*Boiling Limitation*)

Ο περιορισμός λόγω βρασμού προκύπτει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του αγωγού θερμότητας. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες είναι ικανές να προκαλέσουν την έναρξη βρασμού της υγρής φάσης μέσα στο φτιλί. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία φυσαλίδων αερίου μέσα στη δομή του φτιλιού οι οποίες όμως φράζουν κι έτσι εμποδίζουν τη διαδρομή της υγρής φάσης στον εξαερωτήρα μειώνοντας δραματικά την απόδοση του *heat pipe*. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να μετατραπεί όλη η υγρή φάση σε αέρια προκαλώντας ολικό στέγνωμα του φτιλιού. Η μεταφορά θερμότητας κι η αλλαγή της λόγω της εμφάνισης του φαινομένου θα δίδεται από τη σχέση<sup>[25]</sup>:

$$\dot{Q}_b = \frac{4 \pi \cdot l_{eff} \cdot \lambda_{eff} \cdot T_v \cdot \sigma_l}{l_v \cdot \rho_v \cdot \ln \frac{r_i}{r_v}} \cdot \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{eff}} \right) \quad (2.44)$$

όπου  $\lambda_{eff}$  η δραστική θερμική αγωγιμότητα του φτιλιού και του εργαζόμενου μέσου σε  $\frac{W}{m \cdot K}$ ,  $T_v$  η θερμοκρασία κορεσμού της αέριας

φάσης σε  $K$ ,  $r_i$  η εσωτερική ακτίνα του σωληνωτού σε  $m$ ,  $r_v$  η ακτίνα του πυρήνα της αέριας φάσης σε  $m$  και  $r_n$  η ακτίνα πυρήνωσης σε  $m$ .



## Κεφάλαιο 3 Πειραματική Διάταξη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Στην αρχή παρουσιάζονται οι διάφοροι περιορισμοί και τα κριτήρια σχεδίασης που επιλέχθηκαν προκειμένου το πείραμά μας να προσομοιάζει όσο το δυνατόν πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, εν συνεχεία περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης, παραθέτοντας κι έναν μεγάλο αριθμό σχεδίων και φωτογραφιών και τέλος, ακολουθούν οι συσκευές μετρήσεων, η συνδεσμολογία τους και οι αναγκαίες υποστηρικτικές διατάξεις.

### 3.1 Σχεδίαση του μοντέλου προσομοίωσης<sup>[27]</sup>

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων του πειράματος κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός διάταξης η οποία θα προσομοίωνε τη διαδικασία ψύξης του επεξεργαστή ενός Η/Υ με τη βοήθεια ενός αγωγού θερμότητας (*heat pipe*), σε κλίμακα 1:1, μαζί με έναν ανεμιστήρα, όπως ακριβώς συμβαίνει και στη συντριπτική πλειοψηφία των φορητών Η/Υ.

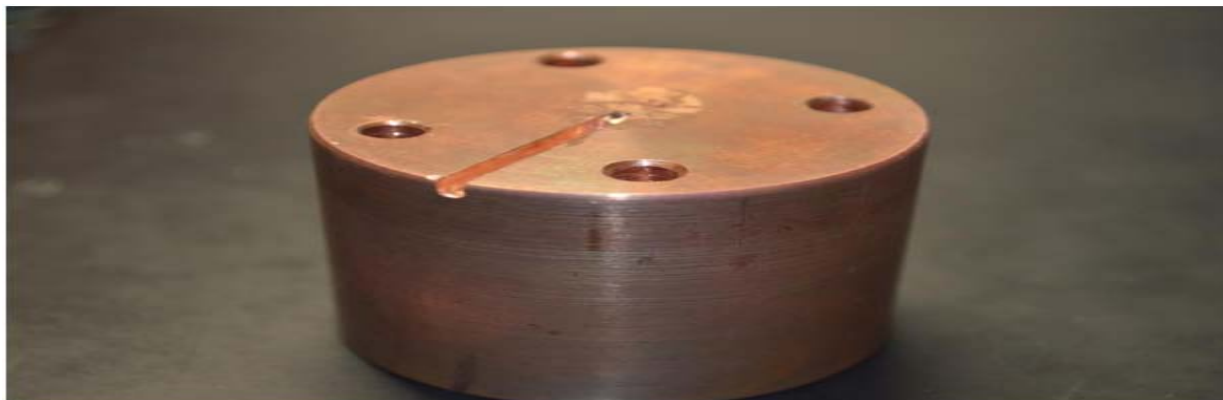
Σε ό, τι αφορά το κομμάτι του επεξεργαστή, η επιλογή του κατάλληλου υλικού ήταν απαιτητική δεδομένου του γεγονότος ότι στο εσωτερικό του υπολογιστή εμφανίζονται υψηλές τιμές θερμοκρασιών και μεγάλα ποσά θερμότητας. Επομένως, θα έπρεπε να προτιμηθεί ένα υλικό με εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα καθώς και θερμική διαχυτότητα που θα είναι ικανό να φθάσει σχετικά γρήγορα στη μόνιμη κατάσταση και χωρίς διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του. Από οικονομικής πλευράς, κρίθηκε ασύμφορη η χρήση άργυρου ( $k=429 \frac{W}{m \cdot K}$  στους 300 K) ή διαμαντιού τύπου ΙΙΑ ( $k=2300 \frac{W}{m \cdot K}$  στους 300 K), ενώ ακόμη κι η επιλογή της χρήσης ενός αυτούσιου επεξεργαστή Η/Υ απορρίφθηκε εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του. Τελικά, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο χαλκός ( $k=401 \frac{W}{m \cdot K}$ ,  $\alpha=116 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  στους 300 K) και πιο συγκεκριμένα ένα κυλινδρικό τεμάχιο διαμέτρου 50 mm και ύψους 42 mm αποτέλεσε το υλικό κατασκευής του πυρήνα της πειραματικής διάταξης.

### 3.2 Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης

Για πρακτικούς λόγους συναρμογής και ακεραιότητας της συσκευής πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη τεσσάρων οπών διαμέτρου 5 mm καθ' όλο το ύψος του πυρήνα, μιας επιπλέον οπής διαμέτρου 4 mm σε βάθος 19 mm στο κέντρο του δοκιμίου και στη συνέχεια μια διεύρυνση 11 mm σε βάθος 16 mm προκειμένου να τοποθετηθεί κατάλληλα ο ακροδέκτης του *soldering iron*. Επιπρόσθετα, για τη δρομολόγηση του θερμοστοιχείου και τη μέτρηση της θερμοκρασίας του πυρήνα κρίθηκε αναγκαία η διάνοιξη καναλιού διαστάσεων 4 mm x 4 mm ακτινικά στη διεπιφάνεια πυρήνα- εξαιρωτήρα μήκους 25 mm (Εικόνες 3.1 & 3.2).



Εικόνα 3.1 Το δοκίμιο του πυρήνα κατασκευασμένο από χαλκό με τη κεντρική οπή ενθυλάκωσης του *soldering iron* και τις τέσσερις οπές για τις κοχλιοσυνδέσεις



Εικόνα 3.2 Το δοκίμιο του πυρήνα κατασκευασμένο από χαλκό με το κανάλι εγκατάστασης του θερμοστοιχείου και τις τέσσερις οπές για τις κοχλιοσυνδέσεις

Η επιθυμητή θέρμανση στο χάλκινο δοκίμιο του πυρήνα επετεύχθη με τη χρήση του *soldering station* της εταιρείας *Parkside*, τύπου *PLS 48 C1*, με δυνατότητα επίτευξης εύρους θερμοκρασιών 0-500 °C. Οι αναγραφόμενες προδιαγραφές του είναι 230 V, 50 Hz και ονομαστική ισχύς 48 Watt (Εικόνα 3.3). Σ' αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη τιμή ισχύος αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος εισόδου δεδομένων για τους περισσότερους Η/Υ κι επομένως αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για χρήση στο πείραμά μας.



Εικόνα 3.3 Το *soldering station* της εταιρείας *Parkside* με τον ακροδέκτη του *soldering iron* που τοποθετήθηκε στον πυρήνα χαλκού

Προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της αύξησης της θερμικής αντίστασης στη διεπιφάνεια πυρήνα- εξαερωτήρα από την ανάπτυξη υψηλών ποσών θερμότητας και τιμών θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκε θερμοαγώγιμη πάστα της εταιρείας *Deer Cool*, τύπου *Z3* με θερμική αγωγιμότητα  $k > 1.134 \frac{W}{m \cdot K}$  και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 Επάλειψη του πυρήνα χαλκού με τη θερμοαγώγιμη πάστα πριν τη συναρμολόγηση

Ο αγωγός (*heat pipe*) που χρησιμοποιήθηκε για την απαγωγή της θερμότητας του πυρήνα από χαλκό είναι της εταιρείας *Forcecon*, μήκους  $212\text{ mm}$ , πεπλατυσμένης διατομής  $7,6\text{ mm} \times 3,4\text{ mm}$ , ενώ η αρχική κυκλική του διατομή, πριν τη συμπίεση, ήταν  $6\text{ mm}$ . Το υλικό κατασκευής του περιβλήματος είναι χαλκός πάχους  $0,5\text{ mm}$ , ενώ η δομή του φιτιλιού εσωτερικά είναι πυροσυσσωματωμένης κόνεως (*sintered powder*) πάχους επίσης  $0,5\text{ mm}$ . Το εργαζόμενο μέσο εσωτερικά του αγωγού είναι αποσταγμένο νερό<sup>[27]</sup>.

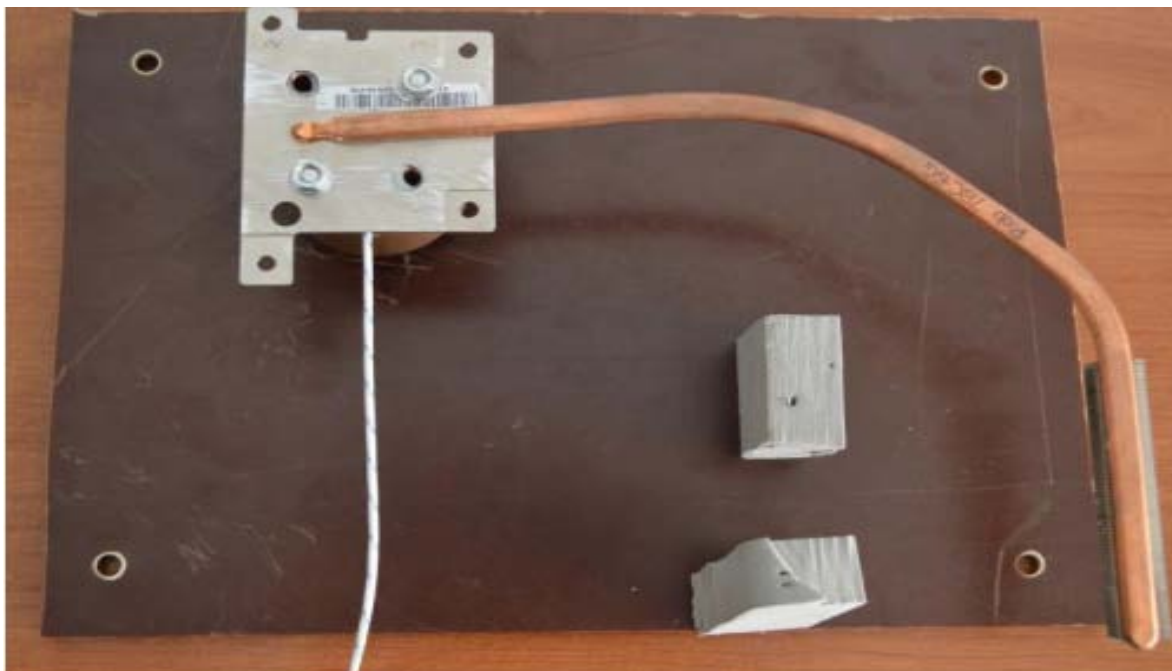
Το τμήμα του συμπυκνωτή φέρει 62 πτερύγια ψύξης από αλουμίνιο, ορθογωνικής διατομής, τα οποία βρίσκονται στην έξοδο του αέρα από τον ανεμιστήρα κι αποβάλλουν τη θερμότητα μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1) φαίνονται μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιηθέντος αγωγού θερμότητας.

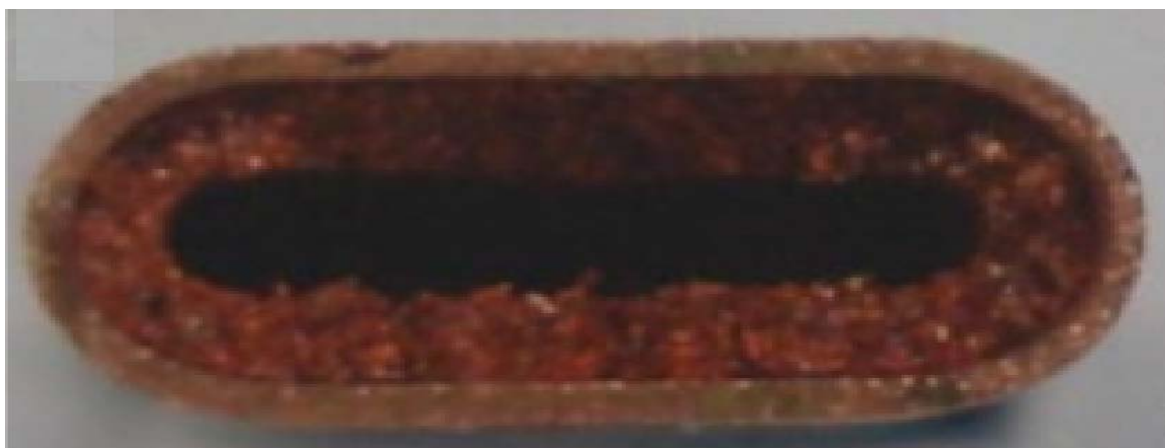
<i>Characteristic</i>	<i>Dimensions/Material</i>
Evaporator length $L_e$	30 mm
Condenser Length $L_c$	72 mm
Adiabatic length $L_{ad}$	110 mm
Flat heat pipe	7.6 mm $\times$ 3.4 mm (width $\times$ thickness)
Original diameter (OD)	6 mm
Heat pipe Container thickness	0.5 mm
Wick thickness	0.5 mm
Working fluid	Water
Wick structure	Sintered copper powder
Material of pipe	Copper

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αγωγού θερμότητας (*heat pipe*)<sup>[27]</sup>



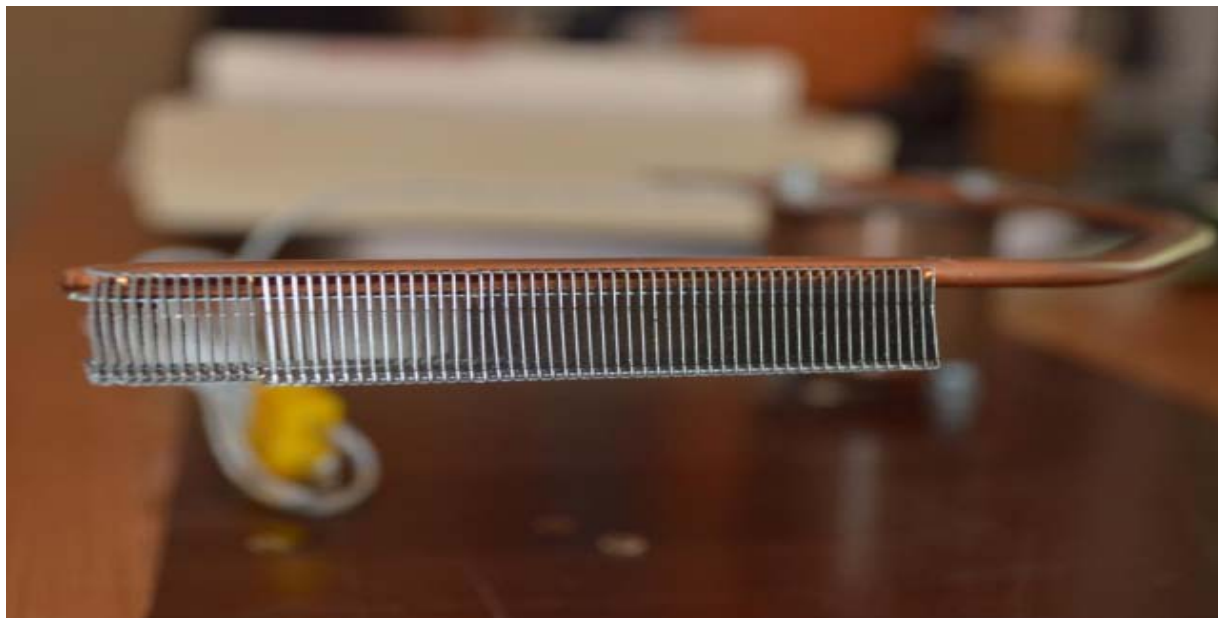


Εικόνα 3.5 Το *heat pipe* κατά τη διαδικασία της συναρμολόγησης<sup>[27]</sup>



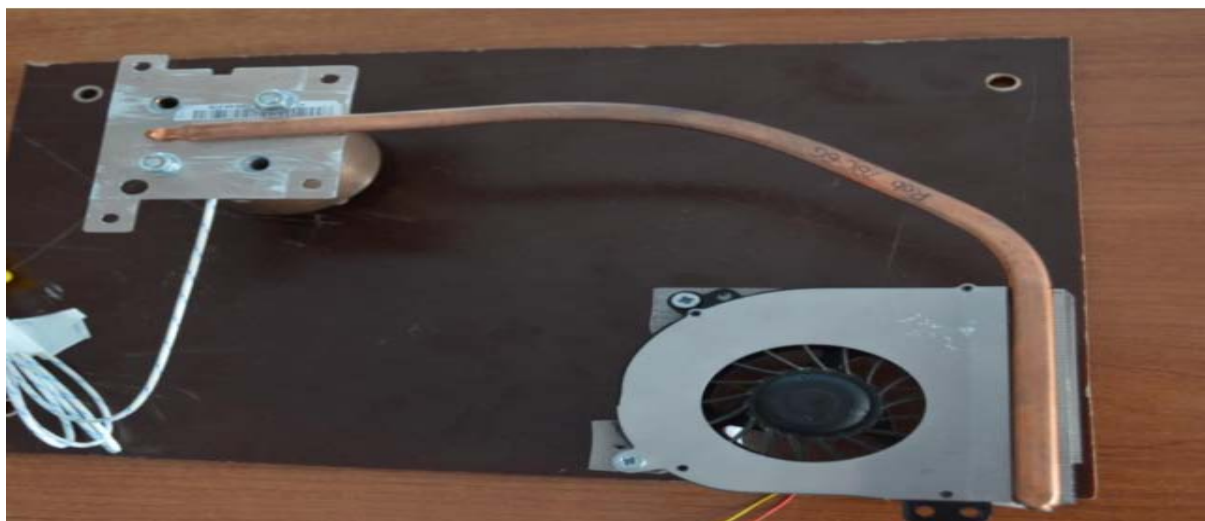
Εικόνα 3.6 Το εσωτερικό του *heat pipe* με τη δομή του φιλτιλιού *Sintered Powder*

Ο ανεμιστήρας είναι τύπου φυσητήρα (*Blower*) και πιο συγκεκριμένα ακτινικής ροής, της εταιρείας *Forcecon*, τύπου *F6J0-CW*, και συνεργάζεται με ηλεκτροκινητήρα (*Brushless Motor*) συνεχούς τάσεως  $5V$  και εντάσεως  $0,5A$ .



Εικόνα 3.7 Τα πτερύγια ψύξης στο τμήμα του συμπυκνωτή του *heat pipe*

Όλα τα παραπάνω στοιχεία εδράζονται σε δύο επιφάνειες διαστάσεων  $280\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  πάχους  $2\text{ mm}$  από βακελίτη, εκατέρωθεν του οποίου έχει τοποθετηθεί στρώμα υαλοβάμβακα πάχους  $50\text{ mm}$  για μονωτική προστασία. Η όλη διάταξη εσωκλείεται με δύο τεμάχια από *sea plywood* διαστάσεων  $280\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  και πάχους  $7\text{ mm}$ <sup>[27]</sup>.



Εικόνα 3.8 Στο κάτω δεξί τμήμα της διάταξης η εγκατάσταση του ανεμιστήρα με ενσωματωμένο ηλεκτροκινητήρα<sup>[27]</sup>





Εικόνα 3.9 Χρώση του αγωγού θερμότητας (*heat pipe*) σε μαύρο ματ χρώμα

Σε αυτό το σημείο, πάλι, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ανάγκης χρήσης της παραπάνω διάταξης στη διεξαγωγή κι άλλων πειραμάτων, έχει διανοιχτεί ένα παράθυρο σε σχήμα όμοιο του αγωγού θερμότητας με αποτέλεσμα να είναι ορατός ο αγωγός. Στην υπό εξέταση εργασία, το συγκεκριμένο παράθυρο καλύφθηκε επίσης με ποσότητα υαλοβάμβακα για την αποφυγή θερμικών απωλειών, καθώς δεν εξυπηρετούσε σε τίποτα η ύπαρξή του στη παρούσα μελέτη.



Εικόνα 3.10 Αριστερά: Παράθυρο σκόπευσης στο *heat pipe* & Δεξιά: Επικάλυψη του παραθύρου σκόπευσης με τη χρήση υαλοβάμβακα

Η ολοκλήρωση κατασκευής της συσκευής προσομοίωσης περιλαμβάνει επιπρόσθετα τη διάνοιξη των απαραίτητων οπών για τις διάφορες κοχλιοσυνδέσεις, όπως επίσης και τη τοποθέτηση ενός διακόπτη για τον έλεγχο της λειτουργίας του ανεμιστήρα κι ενός ταχυσυνδέσμου για την εξασφάλιση της παροχής συνεχούς ηλεκτρικής ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα του ανεμιστήρα.



Εικόνα 3.11 Τοποθέτηση διακόπτη *On/Off* του ανεμιστήρα και ταχυσυνδέσμου για τη παροχή συνεχούς ισχύος

Τέλος, στο εσωτερικό ολόκληρης της πειραματικής διάταξης τοποθετήθηκε στρώμα υαλοβάμβακα πάχους  $50\text{ mm}$  για θερμική μονωτική προστασία της συσκευής σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον και νάιλον ταινία για τη συγκράτηση του υαλοβάμβακα.



Εικόνα 3.12 Η τελική εικόνα της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης

### 3.3 Όργανα μετρήσεων

Η παρούσα μελέτη άπτεται των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ύστερα από τη κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις διάφορες περιπτώσεις πειραμάτων.

Αρχικά, υπήρξε απαίτηση για τη μέτρηση κάθε στιγμή της θερμοκρασίας του πυρήνα από χαλκό, ώστε να διαπιστωθούν οι χρόνοι εκείνοι στους οποίους αφενός μεν ο πυρήνας μεταβαίνει σε μία μόνιμη κατάσταση θερμικής ισορροπίας κι αφετέρου δε μεταβάλλει τη θερμοκρασιακή του συμπεριφορά ανάλογα με τη συχνότητα και τον τρόπο θέρμανσης και ψύξης του. Για τη συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε θερμοστοιχείο σε συνδυασμό με το *transmitter Jumo* και τον μετατροπέα σήματος της εταιρείας *National Instruments*. Το λογισμικό που εφαρμόστηκε στη παραπάνω μέτρηση ήταν το *LABVIEW*. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με διαφορετική κάθε φορά συχνότητα (*sample rate*) ανάλογα με τα υπό μελέτη σενάρια θέρμανσης του πυρήνα.



Εικόνα 3.13 Το *transmitter Jumo* και το τροφοδοτικό της *Telemecanique*





Εικόνα 3.14 Ο μετατροπέας σήματος της εταιρείας *National Instruments*

Προκειμένου να μελετηθούν οι εναλλαγές στο θερμοκρασιακό προφίλ του πυρήνα από χαλκό, έπρεπε να προσομοιωθεί η εισαγωγή δεδομένων στο σύστημα (θέρμανση του πυρήνα) με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αναγνωρίσιμη από το λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων *LABVIEW*. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη χρήσης μιας τροποποιημένης συσκευής στην οποία τοποθετήθηκε ένας διακόπτης λειτουργίας *On/Off*, δύο μπαταρίες *3A Alkaline, Sony 1,5V* και δύο κλάδοι καλωδιώσεων.



Εικόνα 3.15 Η συσκευή μετατροπής σημάτων- προσομοίωσης των σεναρίων θέρμανσης και ψύξης του πυρήνα από χαλκό και το χρονόμετρο

Τα καλώδια σε μαύρο και κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στο σενάριο θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα του χάλκινου δοκιμίου του πυρήνα αποστέλλοντας τα κατάλληλα κάθε φορά σήματα στον υπολογιστή για αναγνώριση της εκάστοτε κατάστασης λειτουργίας (θέρμανση πυρήνα- εισαγωγή δεδομένων- ισχύος στο σύστημα- *soldering iron* σε λειτουργία- *No3* αναγνώριση σήματος στην οθόνη του υπολογιστή & ψύξη πυρήνα- παύση εισαγωγής δεδομένων- ισχύος στο σύστημα- *soldering iron* εκτός λειτουργίας- *No1* αναγνώριση σήματος στην οθόνη του υπολογιστή).

Για τη μέτρηση του χρόνου εναλλαγής των σεναρίων θέρμανσης και ψύξης του πυρήνα χρησιμοποιήθηκε ένα κοινό χρονόμετρο γραφείου της εταιρίας *Auriol*. Η συγκεκριμένη συσκευή περιλαμβάνει κι ενσωματωμένη ένδειξη για μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 3.16 Το χρονόμετρο *Auriol* των μετρήσεων

## Κεφάλαιο 4 Πειραματική Μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική επεξήγηση της πειραματικής διαδικασίας και των αναλυτικών υπολογιστικών μεθόδων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη καταγραφή κι επεξεργασία των μετρήσεων των υπό μελέτη φυσικών φαινομένων. Αρχικά, γίνεται αναλυτική αναφορά στις συνθήκες και τη μεθοδολογία υλοποίησης των πειραμάτων. Στη συνέχεια, με τη χρήση ειδικού λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων υπολογίζεται ο χρόνος διάχυσης της θερμότητας από το σημείο εισόδου της στο χάλκινο δοκίμιο (πυρήνας) μέχρι το σημείο εξόδου από αυτό. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενη χρονικά ισχύ εισόδου, εξετάζεται το είδος της απόκρισης του συστήματος μέσω της ανάλυσης των τιμών της θερμοκρασίας στα διάφορα σενάρια διέγερσης του. Τέλος, γίνεται μελέτη της ψυκτικής απόδοσης του αγωγού θερμότητας ανάλογα με τον προσανατολισμό της πειραματικής διάταξης.

### 4.1 Αρχικοποίηση μεταβλητών και διαδικασία λήψης μετρήσεων

Όλες οι μετρήσεις που διεξήχθησαν χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες με βάση την κατεύθυνση που ήταν τοποθετημένο το μοντέλο προσομοίωσης, οριζόντια και κατακόρυφη. Στην οριζόντια θέση (*HORIZONTAL POSITION*), ο εξαερωτήρας κι ο συμπυκνωτής βρίσκονταν στο ίδιο ύψος, ενώ στη κατακόρυφη (*VERTICAL POSITION*), ο συμπυκνωτής του αγωγού θερμότητας λειτουργούσε σε υψηλότερη θέση από τον εξαερωτήρα. Πιο συγκεκριμένα, στον κατακόρυφο προσανατολισμό το μοντέλο σχημάτιζε γωνία  $90^\circ$  σε σχέση με τον οριζόντιο, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.1).



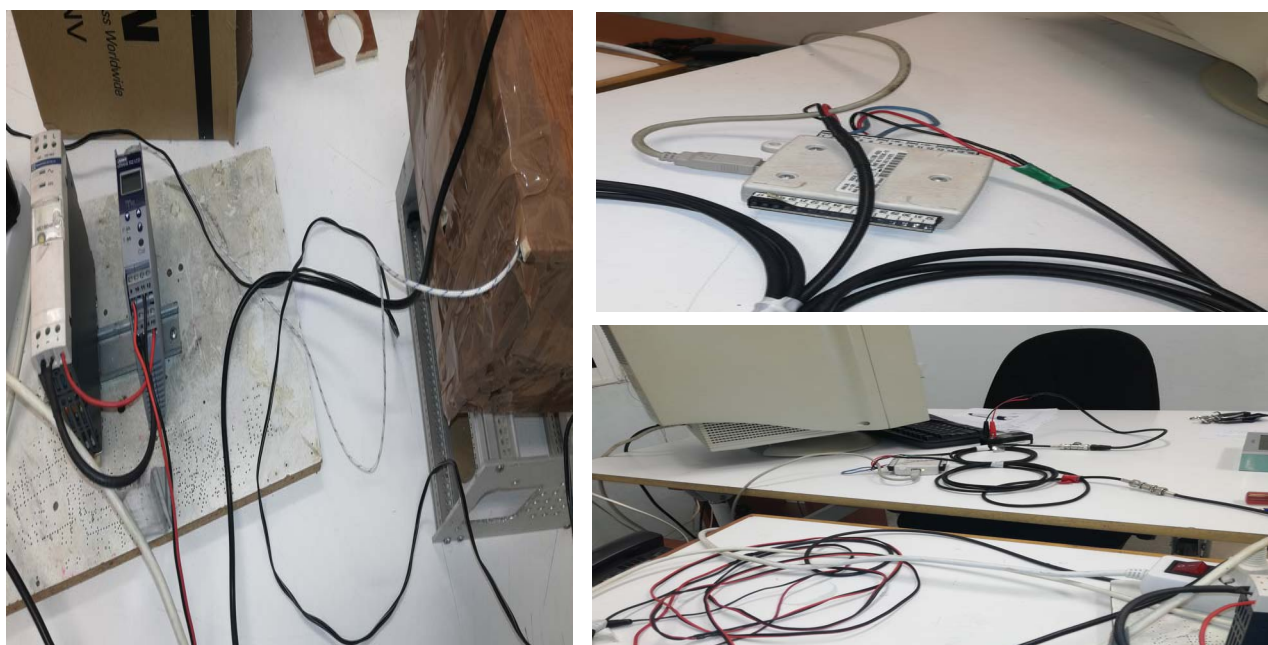
Εικόνα 4.1 Αριστερά: Οριζόντιος προσανατολισμός (*Horizontal position*) & Δεξιά: Κατακόρυφος προσανατολισμός (*Vertical position*) της πειραματικής διάταξης



Για τη μέτρηση των τιμών θερμοκρασίας στον πυρήνα του επεξεργαστή ήταν αναγκαία η χρήση του *soldering station* και κατάλληλου θερμοστοιχείου. Ο ακροδέκτης του *soldering iron* τοποθετήθηκε καταλλήλως στο κάτω μέρος του χάλκινου δοκιμίου κι αυτός του θερμοστοιχείου στο επάνω τμήμα του, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο.

Το *soldering station* διαθέτει περιστρεφόμενο διακόπτη- ροοστάτη ο οποίος ρυθμίζει την εκάστοτε ισχύ εξόδου. Η ισχύς εξόδου του *soldering iron* αποτελεί την ισχύ εισόδου του υπό μελέτη συστήματος, διότι ο ακροδέκτης του είναι ουσιαστικά εμφυτευμένος μέσα στο χάλκινο δοκίμιο. Στη παρούσα εργασία, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικές τιμές ισχύος [48W, 24W].

Το θερμοστοιχείο καταγράφει τις τιμές θερμοκρασίας του πυρήνα στη πλευρά του εξαερωτήρα κάθε χρονική στιγμή και τις μετατρέπει σε ηλεκτρικό δυναμικό. Στη συνέχεια, το *transmitter Jumo* με το οποίο είναι συνδεδεμένο το θερμοστοιχείο, μετατρέπει αυτό το δυναμικό σε ένδειξη θερμοκρασιών στην οθόνη του. Το *transmitter Jumo* είναι με τη σειρά του συνδεδεμένο με τον μετατροπέα σήματος της *National Instruments* ο οποίος μεταφέρει τις ενδείξεις αυτές σε ψηφιακή μορφή στον Η/Υ μέσω του πρώτου καναλιού (*channel 0*) για περεταίρω επεξεργασία από το λογισμικό *LABVIEW*, όπως διακρίνεται στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 Αριστερά: Το άσπρο καλώδιο του θερμοστοιχείου καταλήγει στο *transmitter Jumo* & Δεξιά: Η διασύνδεση του *transmitter Jumo* με τον μετατροπέα σήματος της *National Instruments* κι αυτός με το πρόγραμμα *LABVIEW* στον Η/Υ

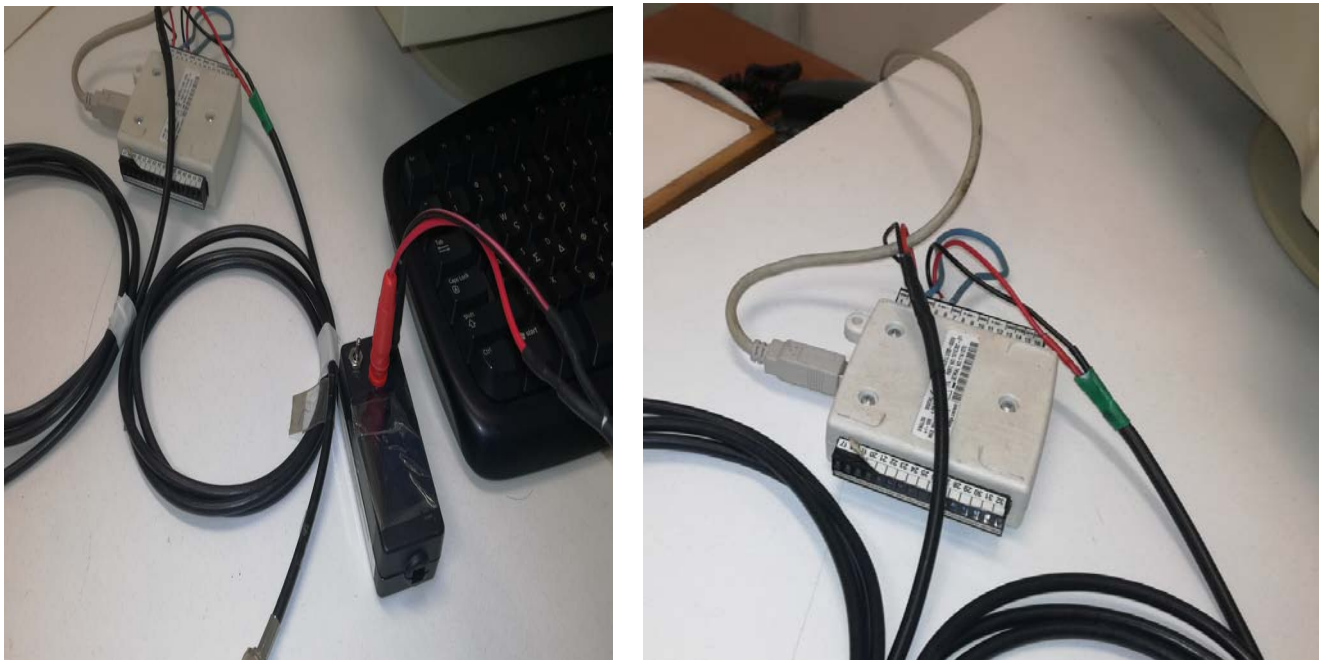
Ο ανεμιστήρας που είναι τοποθετημένος στη πλευρά του συμπυκνωτή του *heat pipe* αμέσως μετά τα πτερύγια ψύξης, λειτουργεί μέσω συνεχούς τάσης με τη χρήση μετασχηματιστή- ανορθωτή, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα επιλογής του ύψους της τάσης τροφοδοσίας (Εικόνα 4.3). Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία του ανεμιστήρα σε διάφορες ταχύτητες και κατ' επέκταση τη μεταβολή του ρυθμού απαγωγής θερμότητας από τα πτερύγια του συμπυκνωτή του *heat pipe*. Στη συγκεκριμένη πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές τιμές τάσης τροφοδοσίας [1,5V, 6V].



Εικόνα 4.3 Ο μετασχηματιστής-ανορθωτής τάσης του *fan* (ανεμιστήρα)

Ο αυτοσχέδιος διακόπτης που χρησιμοποιήθηκε ήταν κι αυτός συνδεδεμένος στον μετατροπέα σήματος της *National Instruments* μέσω δεύτερου καναλιού (*channel 1*) κι η λειτουργία του έγκειται στη μετατροπή της πληροφορίας της παρουσίας ή μη ισχύος εισόδου στο σύστημα σε ψηφιακό σήμα στο λογισμικό *LABVIEW* (Εικόνα 4.4). Ο διακόπτης διαθέτει δύο θέσεις λειτουργίας, *On* (Εισαγωγή ισχύος στο σύστημα) και *Off* (Μη εισαγωγή ισχύος στο σύστημα), η επιλογή των

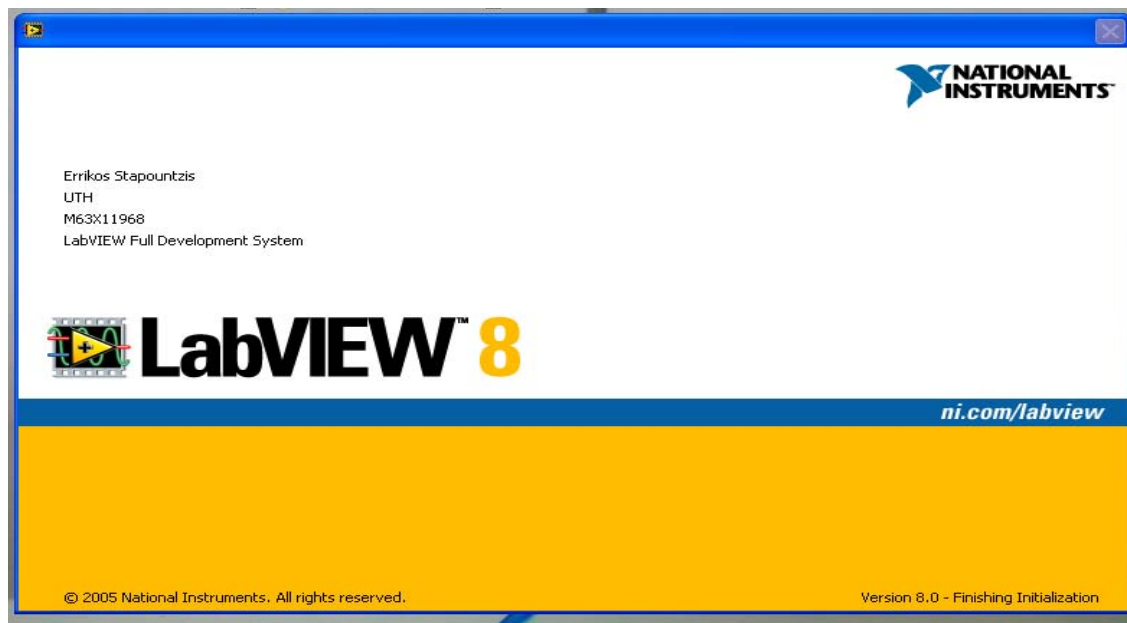
οποίων γίνεται χειροκίνητα ανάλογα με το αν το *soldering iron* θερμαίνει ή όχι τον πυρήνα.



Εικόνα 4.4 Αριστερά: Η διασύνδεση του αυτοσχέδιου διακόπτη *On/Off* στον μετατροπέα της *National Instruments* & Δεξιά: Τα δύο κανάλια του μετατροπέα (*Channels 0 & 1*) που καταλήγουν στο πρόγραμμα *LABVIEW* του Η/Υ

Σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, απαραίτητο εργαλείο αποτέλεσε το χρονόμετρο *Auriol*. Η συγκεκριμένη συσκευή βοήθησε στην ακριβή χρονικά εναλλαγή της εισαγόμενης ισχύος στο χάλκινο δοκίμιο μέσω του *soldering iron* του οποίου η ενεργοποίηση κι απενεργοποίηση δηλωνόταν κάθε φορά με τη ταυτόχρονη μετακίνηση του διακόπτη *On/Off*, που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο το χρονόμετρο έχει τη δυνατότητα καταγραφής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, γεγονός που ήταν χρήσιμο στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων της εργασίας.

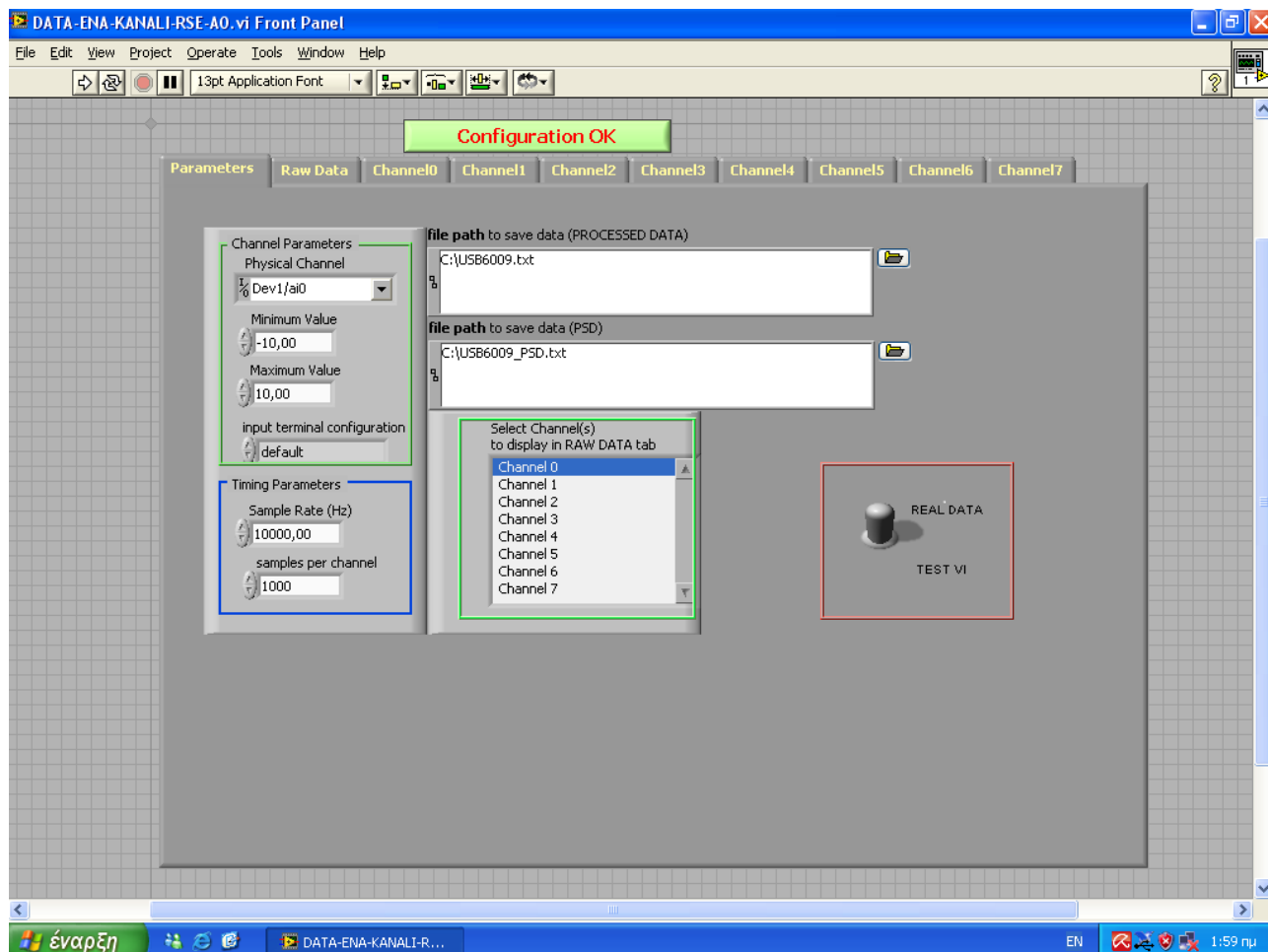
Η συλλογή δεδομένων των μετρήσεων επετεύχθη μέσω της χρήσης του λογισμικού προγράμματος *LABVIEW* στο οποίο εφαρμόσθηκε και μια πρώτη εν μέρη επεξεργασία των τιμών των πειραμάτων. Στη συνέχεια, τα εν λόγω δεδομένα υπέστησαν περεταίρω επεξεργασία μέσω της ανάλυσής τους σε ειδικό μαθηματικό πρόγραμμα (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5 Έναρξη του προγράμματος επεξεργασίας δεδομένων LABVIEW

Το πρόγραμμα *LABVIEW* καταγράφει μετρήσεις δεδομένων με τη βοήθεια αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι στα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Οι αισθητήρες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συνδέονται στο *hardware* τμήμα του προγράμματος το οποίο είναι ο μετατροπέας σήματος της *National Instruments*. Το *software* του προγράμματος αποτελεί μια εύχρηστη πλατφόρμα διαχείρισης του τρόπου συλλογής των δεδομένων με πολλές δυνατότητες. Αυτές είναι η επιλογή του πλήθους των καναλιών εισαγωγής δεδομένων, της συχνότητας δειγματοληψίας, του αριθμού δειγμάτων στο πείραμα και κατ' επέκταση του χρόνου δειγματοληψίας. Η αρχικοποίηση των μεταβλητών του προγράμματος γίνεται στη καρτέλα *Parameters*. Εκεί, στο παράθυρο *Channel Parameters* υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του αριθμού των καναλιών (*Physical Channel*), καθώς και του εύρους τιμών της δειγματοληψίας (*Minimum/Maximum Value*). Επιπλέον, στο παράθυρο *Timing Parameters* μπορεί να δηλωθεί η συχνότητα (*Sample Rate(Hz)*) κι ο αριθμός δειγμάτων για κάθε κανάλι. Ακριβώς δίπλα, σημειώνεται το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευθούν τα δεδομένα καθώς και η τοποθεσία αυτού (*file path to save data*). Ενώ, από κάτω βρίσκεται το παράθυρο *Select Channel(s) to display in RAW DATA tab* όπου γίνεται επιλογή των καναλιών που θα προβληθούν στη καρτέλα *Raw Data* μετά το τέλος της δειγματοληψίας. Για τη παρούσα διπλωματική, οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν φαίνονται στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.6).





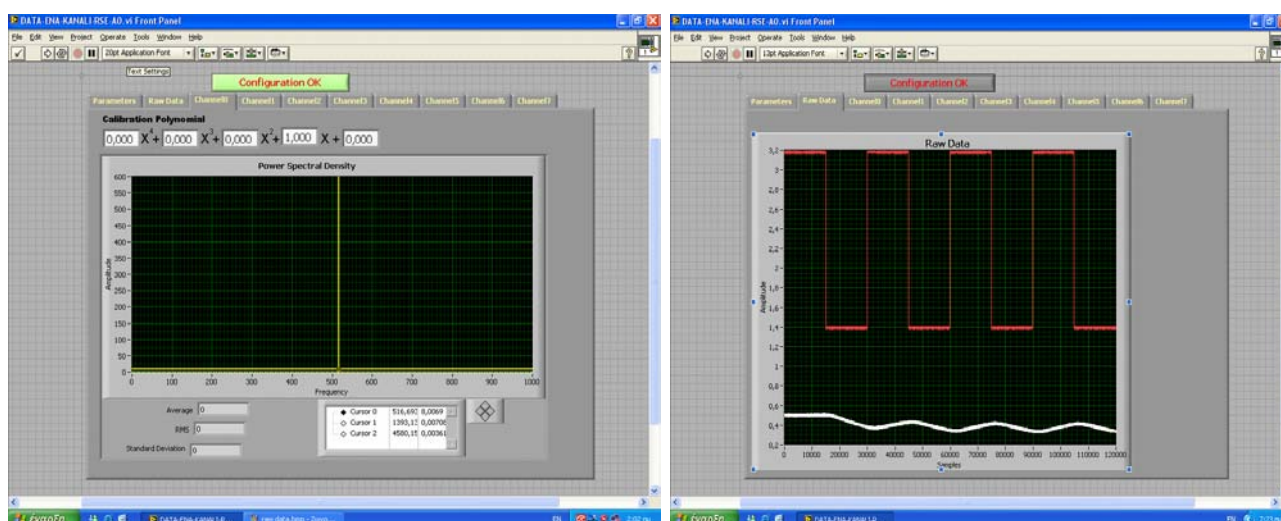
Εικόνα 4.6 Το περιβάλλον εργασίας του *LABVIEW* με τις τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν

Σε κάθε εκτελεσθέν πείραμα, το όνομα του αρχείου τροποποιούνται καταλλήλως με τον κώδικα ονομασίας που θα επεξηγηθεί παρακάτω κι ο αριθμός δειγμάτων άλλαζε επίσης, έτσι ώστε να είναι επαρκής για την μελέτη του κάθε φαινομένου. Η επιλογή των 50Hz προτιμήθηκε λόγω του ότι παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια κι ευκρίνεια στην κατανομή των τιμών. Τα παράθυρα *Channel Parameters* και *Select Channel(s) to display in RAW DATA tab* παρέμειναν ίδια για όλα τα πειράματα.


Επίσης, για όλες τις διατάξεις στο *Calibration Polynomial* των καρτελών *Channel0* και *Channel1* (τα κανάλια δειγματοληψίας) επιλέχθηκε η τιμή **1,000X** και μηδενίστηκαν οι συντελεστές των υπόλοιπων μεταβλητών *X* καθώς κι η σταθερά της παράστασης. Η επιλογή του συντελεστή **1,000** για τον όρο *X* έχει ως αποτέλεσμα

το *LABVIEW* να προβάλλει τις μετρούμενες τιμές στα αποτελέσματα ακριβώς όπως αυτές διαβάζονται από το πρόγραμμα χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία (Εικόνα 4.7).

Τέλος, στην καρτέλα *Raw Data* προβάλλονται σε σύστημα συντεταγμένων οι τιμές θερμοκρασίας (*Channel0*) και οι τιμές της θέσης του διακόπτη *On/Off* (*Channell*) μετά το τέλος της κάθε δειγματοληψίας. Το διάγραμμα της θερμοκρασίας του πυρήνα αναπαριστάται με λευκό χρώμα, ενώ η θέση του διακόπτη (διέγερση του συστήματος) με κόκκινο. Στον κατακόρυφο άξονα αναγράφονται οι μετρούμενες τιμές (*Amplitude*) και στον οριζόντιο ο αριθμός των δειγμάτων (*Samples*) (Εικόνα 4.7). Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν πηγή για μια πρώτη μη ακριβή εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση τις τιμές των μετρήσεων.



Εικόνα 4.7 Αριστερά: Δήλωση της μεταβλητής *X* των *channels 0 & 1* & Δεξιά: Ένα τυπικό διάγραμμα *Raw Data* σε περιβάλλον *LABVIEW*

Αφού ορισθούν οι μεταβλητές κι οι παράμετροι του κάθε πειράματος, ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει τη μέτρηση και τη καταγραφή των τιμών επιλέγοντας τα εικονίδια *Run*  και *Configuration OK*. Configuration OK

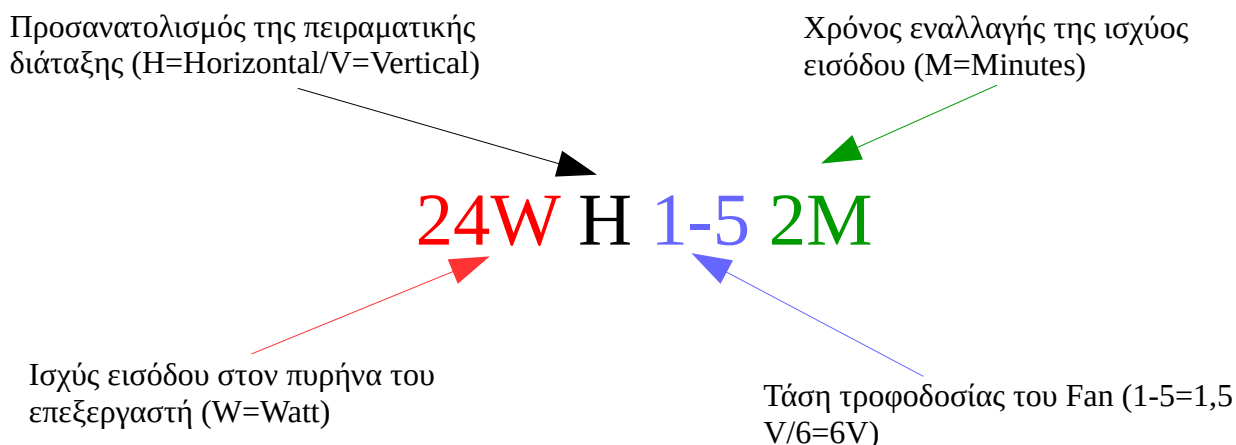
Η λήψη τιμών παύει αυτόματα όταν παρέλθει το πλήθος των δειγμάτων που έχουν εισαχθεί στο παράθυρο *Timing Parameters*.

Όλα τα καταγραφέντα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τη μορφή στηλών σε αρχείο *.txt* στους φακέλους που έχουν προεπιλεχτεί από τον χρήστη του προγράμματος *LABVIEW*. Στη συνέχεια, τα δεδομένα υπό τη παρούσα μορφή μπορούν να εισαχθούν σ' ένα μαθηματικό υπολογιστικό πρόγραμμα για περεταίρω επεξεργασία.



Στη συγκεκριμένη περίπτωση, προτιμήθηκε η χρήση ενός κοινού λογισμικού υπολογισμού στον Η/Υ το οποίο προσφέρει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων μαθηματικών πράξεων, αναλύσεων και μοντελοποίησης των δεδομένων.

Σε αυτό το σημείο θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιήθηκε για την ονομασία του κάθε σεναρίου των πειραμάτων για την κατανόηση των βημάτων που ακολουθήθηκαν από τον αναγνώστη. Αναλυτικότερα, για να είναι ευκολότερη η περιγραφή των συνθηκών και του τρόπου διεξαγωγής της κάθε πειραματικής διαδικασίας, υιοθετήθηκε ένας κώδικας ονομασίας στον οποίο συντομογραφικά αναφέρονται η ισχύς εισόδου στον πυρήνα του επεξεργαστή, ο προσανατολισμός της διάταξης, η τάση τροφοδοσίας του *fan* (ανεμιστήρα) κι ο χρόνος εναλλαγής της ισχύος εισόδου. Όταν στον κώδικα δεν αναγράφεται ο πρώτος όρος (π.χ. V610M), τότε εννοείται μέγιστη ισχύς εισόδου (48 Watt). Τα προαναφερόμενα φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Πρωτόκολλο ονομασίας των σεναρίων διέγερσης των πειραμάτων

#### 4.2 Υπολογισμός του χρόνου διάχυσης

Η εύρεση του χρόνου θερμικής διάχυσης κατά μήκος του χάλκινου δοκιμίου του πυρήνα στηρίχθηκε τόσο στη θεωρητική όσο και στη πειραματική μέθοδο.

Υποθέτοντας μονοδιάστατη ροή θερμότητας και με βάση τη σχέση (2.13), υπολογίστηκε ο εκτιμώμενος χρόνος διάχυσης της θερμότητας από τον ακροδέκτη του *soldering iron* έως το άκρο του θερμοστοιχείου στο δοκίμιο.

Στη συνέχεια, μέσα από την ανάλυση των διαγραμμάτων **COLDSTART** για κάθε πείραμα βρέθηκε πειραματικά ο ίδιος χρόνος. Συγκεκριμένα στο υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, από κάθε διάγραμμα αναλύθηκαν τα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας για την εύρεση της ακριβούς χρονικής στιγμής κατά την



οποία το θερμοστοιχείο “αισθάνεται” για πρώτη φορά μεταβολή της θερμοκρασίας στον πυρήνα. Αναλυτικά διαγράμματα υπολογισμού αυτής της χρονικής στιγμής καθώς και οι τιμές της παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο. Τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.1).

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM MEAN TEMPERATURE (° C)
COLD state 1	6 Vertical	-	120000	40	V6COLDSTART1	19,7
COLD state 2	6 Vertical	-	120000	40	V6COLDSTART2	18,3

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM MEAN TEMPERATURE (° C)
COLD state 1	1,5 Vertical	-	120000	40	V1-5COLDSTART1	19,6
COLD state 2	1,5 Vertical	-	120000	40	V1-5COLDSTART2	17,6

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM MEAN TEMPERATURE (° C)
COLD state	6 Horizontal	-	120000	60	24WH6COLDSTART1	15,8



START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM MEAN TEMPERATURE (° C)
COLD state	1,5 Horizontal	-	120000	60	24WH1-5COLDSTART1	15,6

Πίνακας 4.1 Οι περιπτώσεις μετρήσεων για τον υπολογισμό του χρόνου θερμικής διάχυσης

#### **4.3 Μελέτη της απόκρισης της θερμοκρασίας του πυρήνα**

Για να μελετηθεί η απόκριση της θερμοκρασίας του πυρήνα τόσο ως προς το πλάτος όσο κι ως προς τη φάση της, έγινε δειγματοληψία των τιμών αυτής σε συχνότητα 50Hz με τη χρήση του προγράμματος *LABVIEW*, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έπειτα, ακολούθησε μοντελοποίηση κι επεξεργασία των τιμών που ελήφθησαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Εν συνεχεία, θα εξηγηθούν οι διαδικασίες και τα πρωτόκολλα που έλαβαν χώρα για την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

##### **Πρωτόκολλα δειγματοληψιών**

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις:

- **[V6]** Μέγιστη ισχύς εισόδου 48 *Watt*- Κατακόρυφος προσανατολισμός - Τάση τροφοδοσίας ανεμιστήρα 6*Volts*
- **[V1,5]** Μέγιστη ισχύς εισόδου 48 *Watt*- Κατακόρυφος προσανατολισμός - Τάση τροφοδοσίας ανεμιστήρα 1,5*Volts*
- **[24WH6]** Μέγιστη ισχύς εισόδου 24 *Watt*- Οριζόντιος προσανατολισμός - Τάση τροφοδοσίας ανεμιστήρα 6 *Volts*
- **[24WH1,5]** Μέγιστη ισχύς εισόδου 24 *Watt*- Οριζόντιος προσανατολισμός - Τάση τροφοδοσίας ανεμιστήρα 1,5*Volts*

Αρχικά, για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, μελετήθηκε η μετάβαση του συστήματος σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Η θέρμανση του συστήματος ξεκινούσε από θερμοκρασία δωματίου θέτοντας σε λειτουργία τόσο το *soldering iron* όσο και τον ανεμιστήρα. Η θέρμανση διακόπτονταν μετά από συγκεκριμένο χρόνο στον οποίο η θερμοκρασία του πυρήνα λάμβανε σταθερή τιμή, δηλαδή το σύστημα είχε θερμικά ισορροπήσει. Τα πειράματα αυτά των οποίων ο αλγόριθμος αναλύεται στη συνέχεια ονομάστηκαν *COLDSTART* (ψυχρή εκκίνηση).

### Αλγόριθμος *COLDSTART*

- 1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ→ VERTICAL
- 2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΓΙΑ ΤΑΣΗ  
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ FAN→ 6V
- 3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΡΟΟΣΤΑΤΗ SOLDERING  
STATION→ 48 W
- 4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ FAN→ ON
- 5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ SOLDERING STATION &  
ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ → ON
- 6 ΕΝΑΡΞΗ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ  
LABVIEW/ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΧΡΟΝΟΥ-  
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
- 7 ΑΝΑΜΟΝΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ  
ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ
- 8 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ/ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ  
ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΣΤΟ LABVIEW  
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- 9 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ SOLDERING STATION &  
ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ→ OFF
- 10 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ FAN→ OFF
- 11 ΕΠΙΛΕΞΕΤΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 1 ΕΩΣ 11 ΓΙΑ ΚΑΘΕ  
ΣΕΝΑΡΙΟ *COLDSTART* ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 4.1

Την ολοκλήρωση των μετρήσεων της θερμοκρασίας ισορροπίας του πυρήνα (*COLDSTART*) διαδεχόταν η διακοπόμενη φόρτιση του συστήματος για τη μελέτη της απόκρισης του. Η έναρξη αυτής της φόρτισης λάμβανε χώρα κάθε φορά από τη κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Ο αυτοσχέδιος διακόπτης ταυτόχρονα με το *soldering iron* τίθονταν σε λειτουργία κι απενεργοποιούνταν για ορισμένα χρονικά διαστήματα [1M, 2M, 5M, 10M, 15M, 20M, 25M, 30M], προσομοιάζοντας έτσι την αυξομείωση της ισχύος λειτουργίας ενός επεξεργαστή. Οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν και τα εκτελεσθέντα σενάρια των πειραμάτων φαίνονται αναλυτικότερα στον αλγόριθμο που ακολουθεί και στους πίνακες 4.2, 4.3, 4.4 και 4.5 αντίστοιχα.

### Αλγόριθμος Διακοπτόμενης Ισχύος

- 1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ → VERTICAL
- 2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΓΙΑ ΤΑΣΗ  
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ FAN → 6V
- 3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΡΟΟΣΤΑΤΗ SOLDERING  
STATION → 48 W
- 4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ FAN → ON
- 5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ SOLDERING STATION &  
ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ → ON
- 6 ΑΝΑΜΟΝΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ  
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ
- 7 ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ
- 8 ΕΝΑΡΞΗ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ  
LABVIEW/ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΧΡΟΝΟΥ-  
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
- 9 ΑΝΑΜΟΝΗ ΓΙΑ ΧΡΟΝΟ 1 ΛΕΠΤΟ [1M]
- 10 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ SOLDERING STATION &  
ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ → OFF
- 11 ΑΝΑΜΟΝΗ ΓΙΑ ΧΡΟΝΟ 1 ΛΕΠΤΟ [1M]
- 12 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΗ SOLDERING STATION &  
ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ → ON
- 13 ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ ΒΗΜΑΤΑ 9 ΕΩΣ 12 ΜΕΧΡΙ  
ΤΟΝ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ
- 14 ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΣΤΟ LABVIEW  
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- 15 ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 5 ΕΩΣ 14 ΓΙΑ ΚΑΘΕ  
ΣΕΝΑΡΙΟ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 4.2
- 16 ΕΠΑΝΕΛΑΒΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ 1 ΜΕΧΡΙ 15 ΓΙΑ  
ΚΑΘΕ ΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΙΠΟΥΣ  
ΠΙΝΑΚΕΣ 4.3, 4.4, 4.5



START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM TEMPERATURE (° C)
WARM state	6 Vertical	1	60000	20	V61M	20,8
WARM state	6 Vertical	2	120000	40	V62M	21,1
WARM state	6 Vertical	5	120000	40	V65M	21,2
WARM state	6 Vertical	10	240000	80	V610M	19,5
WARM state	6 Vertical	15	360000	120	V615M	20,6
WARM state	6 Vertical	20	360000	120	V620M	21
WARM state	6 Vertical	25	300000	100	V625M	21
WARM state	6 Vertical	30	360000	120	V630M	21,2

Πίνακας 4.2 Πειράματα με κατακόρυφο προσανατολισμό πυρήνα και τάση τροφοδοσίας FAN 6Volts

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM TEMPERATURE (° C)
WARM state	1,5 Vertical	1	60000	20	V1-51M	20,5





WARM state	1,5 Vertical	2	120000	40	V1-52M	21
WARM state	1,5 Vertical	5	120000	40	V1-55M	21,7
WARM state	1,5 Vertical	10	240000	80	V1-510M	22,3
WARM state	1,5 Vertical	15	360000	120	V1-515M	18,6
WARM state	1,5 Vertical	20	360000	120	V1-520M	19,5
WARM state	1,5 Vertical	25	300000	100	V1-525M	20,6
WARM state	1,5 Vertical	30	360000	120	V1-530M	21,1

Πίνακας 4.3 Πειράματα με κατακόρυφο προσανατολισμό πυρήνα και τάση τροφοδοσίας FAN 1,5Volts

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM TEMPERATURE (°C)
WARM state	6 Horizontal	2	120000	40	24WH62 M	16,7
WARM state	6 Horizontal	10	240000	80	24WH610 M	17,7
WARM state	6 Horizontal	20	360000	120	24WH620 M	18,6



WARM state	6 Horizontal	30	360000	120	24WH630 M	19,1

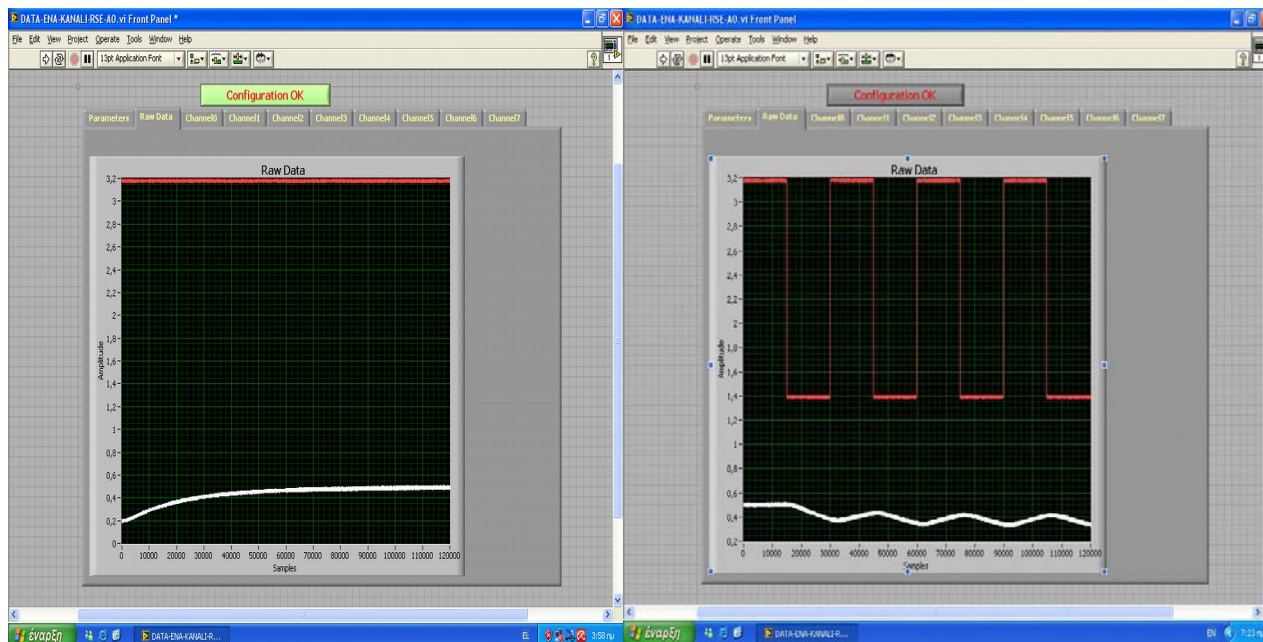
Πίνακας 4.4 Πειράματα με οριζόντιο προσανατολισμό πυρήνα και τάση τροφοδοσίας FAN 6Volts

START from:	VOLTAGE of FAN(Volts) & POSITION	DURATION of HEAT ON/OFF (minutes)	NUMBER of SAMPLES	MIN TOTAL DURATION of EXPERIMENT (minutes)	FILE NAME	ROOM TEMPERATURE (°C)
WARM state	1,5 Horizontal	2	120000	40	24WH1-52M	16,5
WARM state	1,5 Horizontal	10	240000	80	24WH1-510M	17,4
WARM state	1,5 Horizontal	20	360000	120	24WH1-520M	18,7
WARM state	1,5 Horizontal	30	360000	120	24WH1-530M	19,3

Πίνακας 4.5 Πειράματα με οριζόντιο προσανατολισμό πυρήνα και τάση τροφοδοσίας FAN 1,5Volts

### Επεξεργασία μετρήσεων

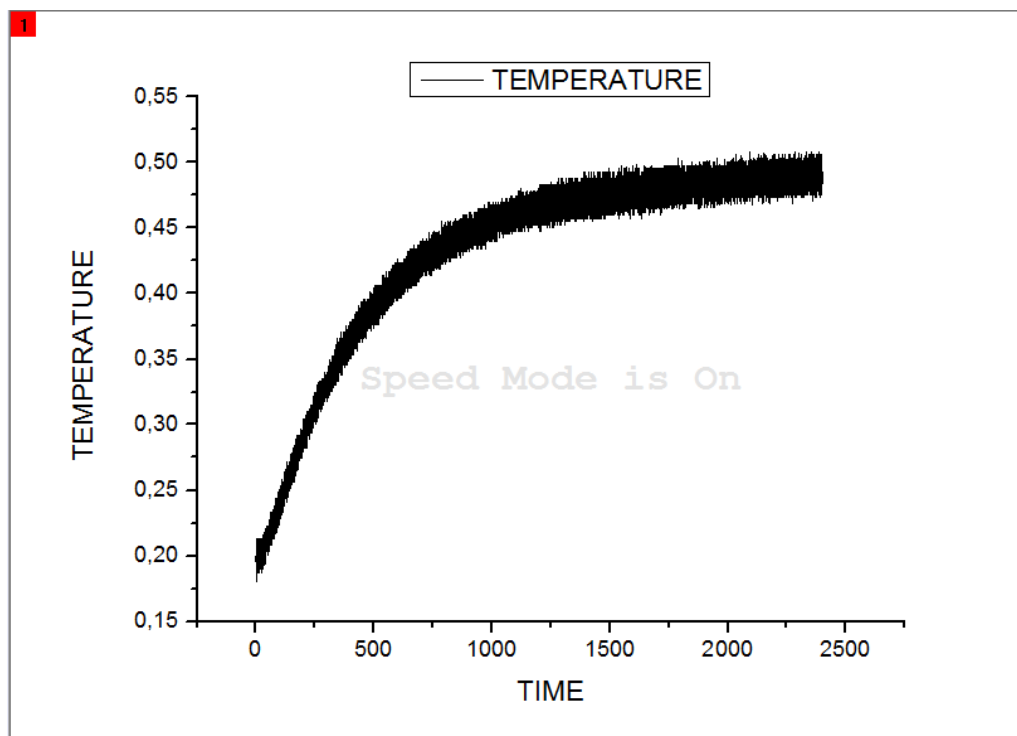
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και μέσω της καρτέλας *Raw Data* του προγράμματος *LABVIEW* παρατηρήθηκε η μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής απόκρισης του υπό μελέτη συστήματος με την αντίστοιχη απόκριση ενός συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως. Η συσχέτιση αυτή εμφανίστηκε τόσο κατά τη διάρκεια βηματικής εισόδου (*COLDSTART*) όσο και κατά την εναλλασσόμενη είσοδο στο σύστημα η οποία και προσομοιάστηκε με περιοδικό ημιτονοειδές σήμα για τη σύγκρισή του με τη θεωρία. Η παραπάνω αναφορά είναι εμφανής μέσω της σύγκρισης των διαγραμμάτων *Raw Data* (Σχήμα 4.2) και των θεωρητικών διαγραμμάτων (Σχήματα 2.15, 2.16 & 2.17) του δευτέρου κεφαλαίου.



Σχήμα 4.2 Διαγράμματα *Raw Data* αριστερά: βηματική είσοδος με κόκκινο χρώμα- απόκριση συστήματος με λευκό χρώμα (V6COLDSTART1) & δεξιά: μεταβαλλόμενη είσοδος με κόκκινο χρώμα- απόκριση συστήματος με λευκό χρώμα (V65M)

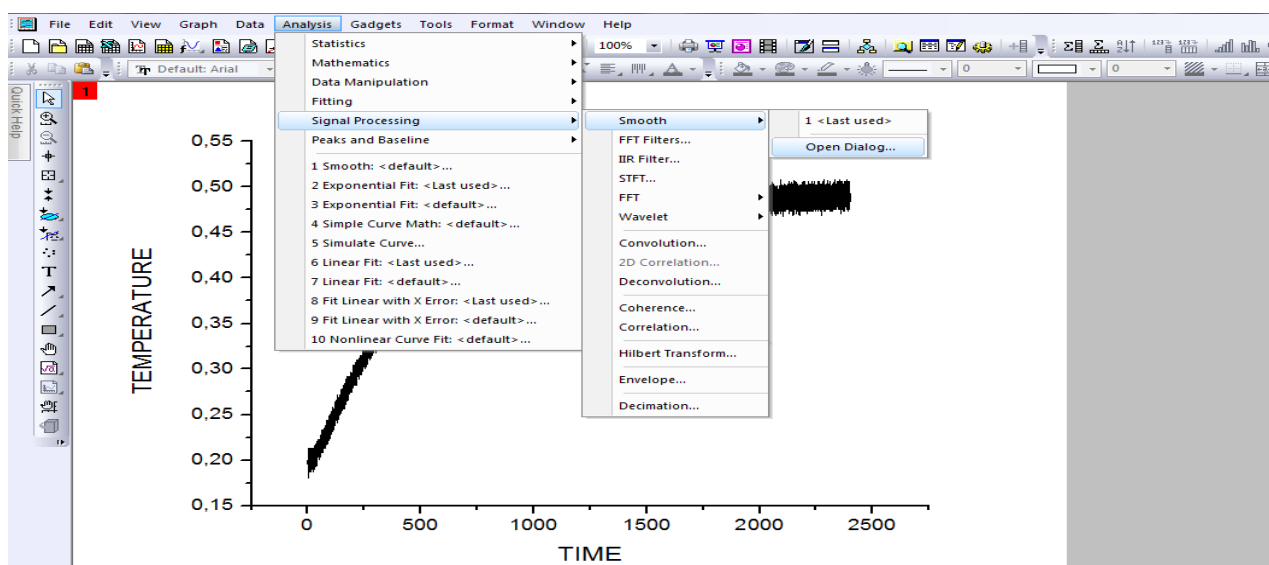
Τα πειράματα *COLDSTART*, όπως προαναφέρθηκε, εμφάνισαν απόκριση βηματικής εισόδου όμοια με αυτή των συστημάτων 1<sup>ης</sup> τάξεως. Με βάση αυτή την απόκριση πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της χρονικής σταθεράς  $\tau$  η οποία κι είναι απαραίτητη για τη μελέτη της μεταβατικής κατάστασης του συστήματος στα επόμενα πειράματα μεταβαλλόμενης ισχύος εισόδου. Η χρονική αυτή σταθερά εξήχθη μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων στο ειδικό υπολογιστικό πρόγραμμα.

Από τα αρχεία τα οποία αποθηκεύτηκαν σε μορφή .txt μέσω του προγράμματος LABVIEW, έγινε εισαγωγή των τιμών θερμοκρασίας στο περιβάλλον επεξεργασίας του προαναφερθέντος υπολογιστικού προγράμματος. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη συχνότητα λήψης των δεδομένων, έγινε αντιστοίχιση της κάθε τιμής με τη χρονική στιγμή στην οποία καταγράφηκε. Η γραφική παράσταση των δύο αυτών στηλών απέδωσε την εξέλιξη της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο όπως διακρίνεται στο σχήμα 4.3.



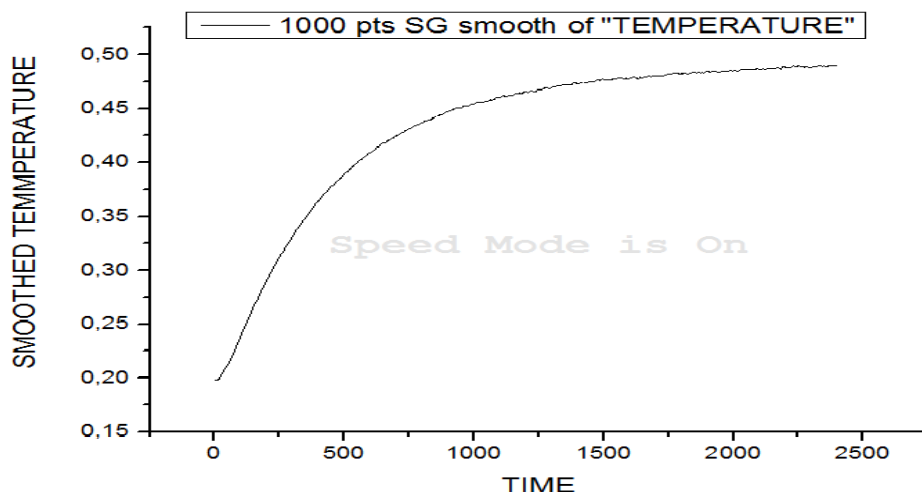
Σχήμα 4.3 Η αρχική καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας πυρήνα σε σχέση με τον χρόνο με την ύπαρξη θορύβου

Η γραφική αυτή παράσταση όμως, παρουσίαζε θόρυβο ο οποίος αποδίδεται σε ατέλειες του *hardware* που χρησιμοποιήθηκε. Για την εξάλειψή του πραγματοποιήθηκε ομαλοποίηση των τιμών αυτών μέσω της επιλογής **smoothing** του προγράμματος (Σχήματα 4.4a & 4.4b).



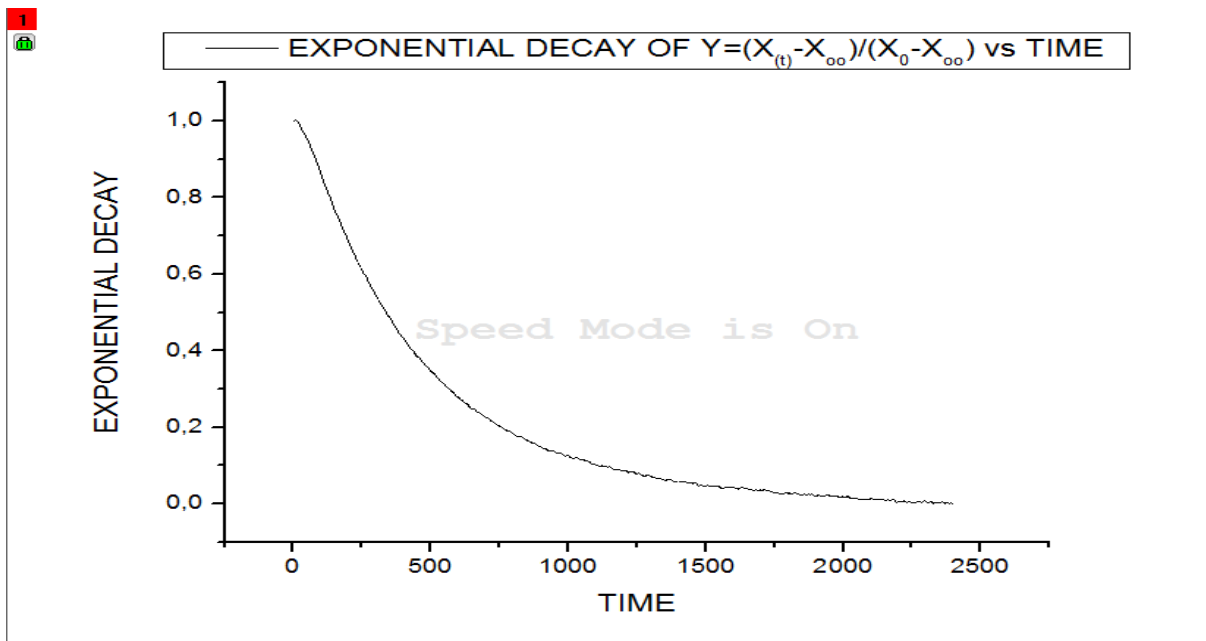
Σχήμα 4.4a Η επιλογή **Smoothing** στο ειδικό υπολογιστικό πρόγραμμα για την εξάλειψη του θορύβου

1



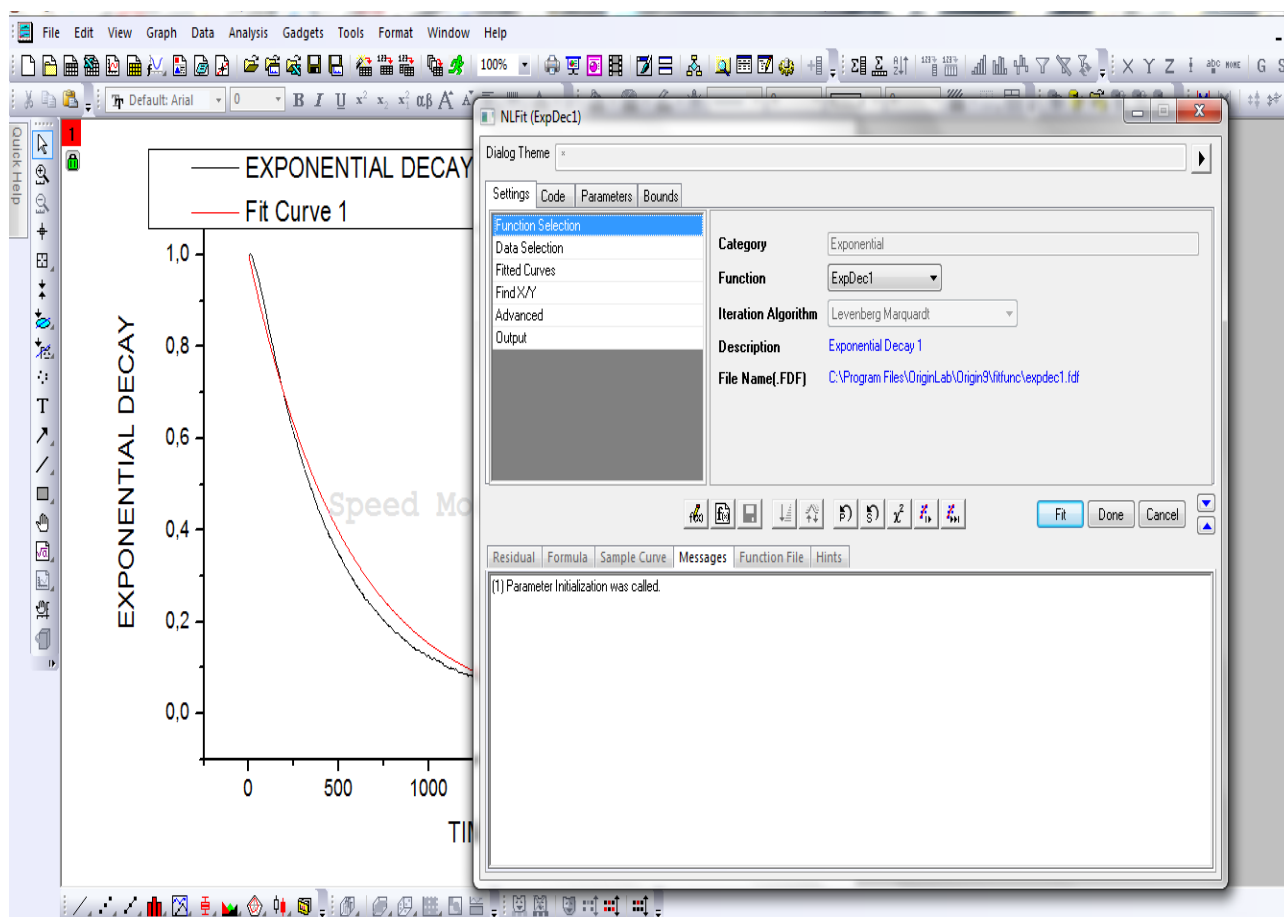
Σχήμα 4.4b Η τελική επεξεργασμένη καμπύλη της θερμοκρασίας πυρήνα χωρίς θόρυβο

Ακολουθώντας, έγινε περεταίρω επεξεργασία της στήλης των θερμοκρασιών μέσω του θεωρητικού τύπου 2.29, που δημιούργησε τη τελική στήλη δεδομένων  $y = \frac{x(t) - x_{\infty}}{x_0 - x_{\infty}}$ . Η γραφική παράσταση αυτής της στήλης με τον χρόνο, όπως υπολογίζεται κι από τη θεωρία ( $y = e^{\frac{-t}{\tau}}$ ) έχει την μορφή συνάρτησης εκθετικής μείωσης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 4.5.



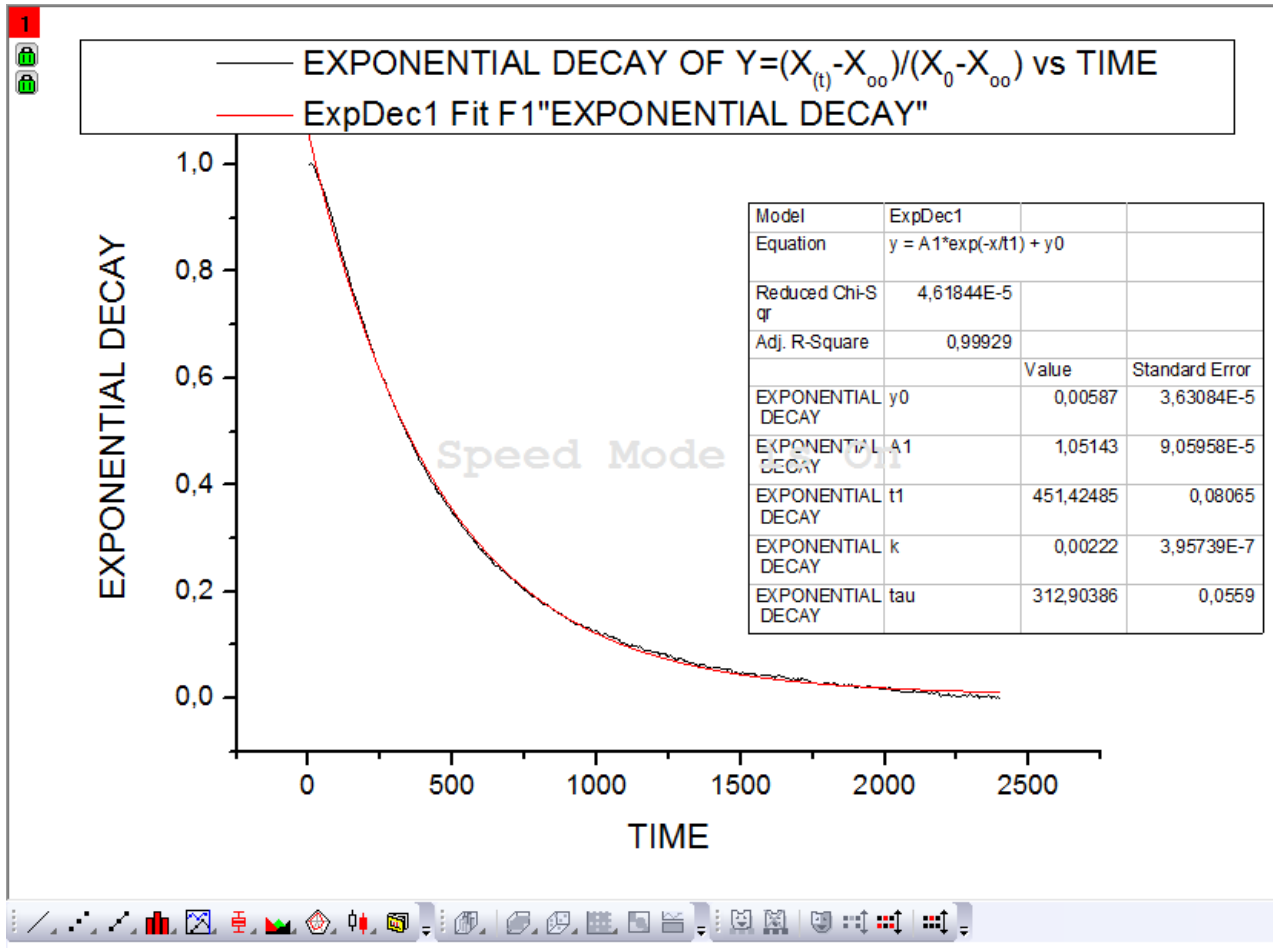
Σχήμα 4.5 Η καμπύλη εκθετικής μείωσης (*Exponential Decay*) των θερμοκρασιών σε σχέση με το χρόνο

Τελικά, μέσω της επιλογής **fitting** του ειδικού υπολογιστικού πακέτου έγινε ταύτιση αυτής της γραφικής παράστασης με την αναλυτική καμπύλη εκθετικής μείωσης που την περιέγραφε πληρέστερα. Από τις παραμέτρους της αναλυτικής έκφρασης εξήχθη η τιμή της χρονικής σταθεράς  $\tau$  του συστήματος. Ο παραπάνω υπολογισμός ακολουθήθηκε για κάθε πείραμα περίπτωσης *COLDSTART* του πίνακα 4.1 (Σχήματα 4.6a & 4.6b).



Σχήμα 4.6a Η επιλογή **Fitting** στο ειδικό υπολογιστικό πρόγραμμα για τη βέλτιστη λύση





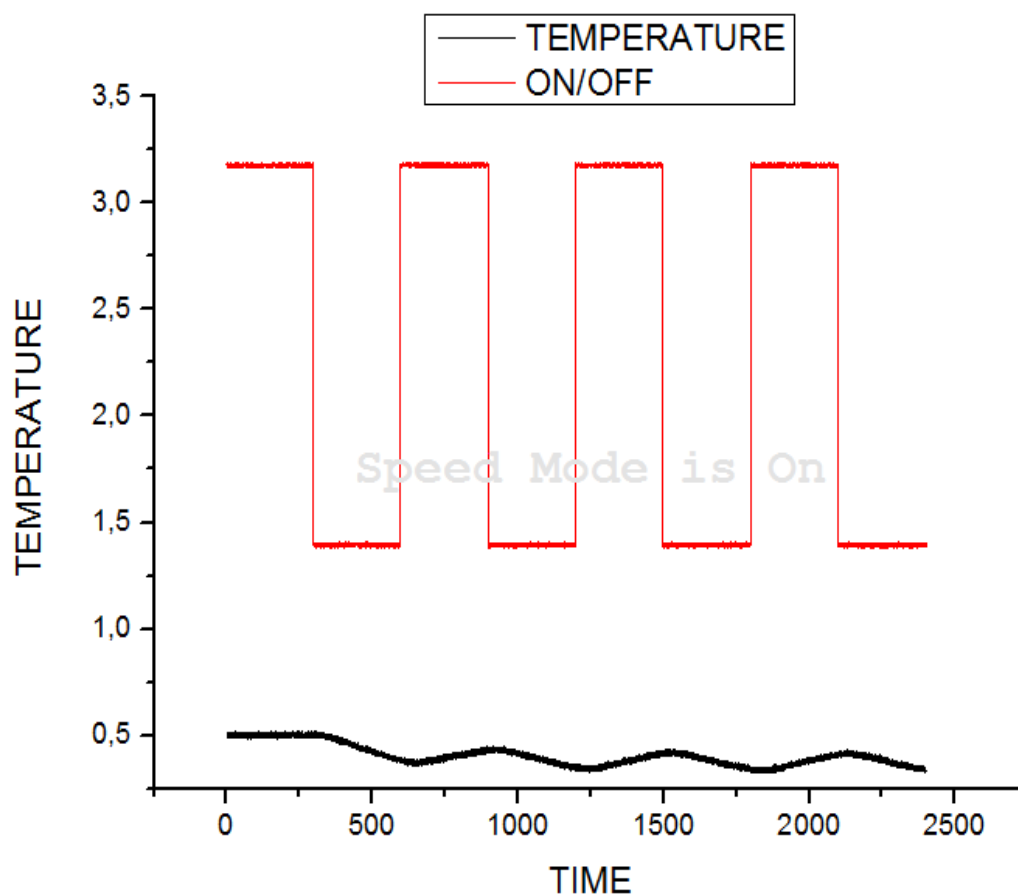
Σχήμα 4.6b Η εύρεση της χρονικής σταθεράς (time constant)  $\tau$  του υπό μελέτη συστήματος

Για τη μελέτη της απόκρισης κατά τη παλμική είσοδο έγινε προσομοίωση του σήματος αυτού μ' ένα αντίστοιχο ημιτονοειδές της ίδιας συχνότητας και πλάτους (στο οποίο μπορούν να γίνουν αναλυτικοί υπολογισμοί) με σκοπό τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της απόκρισης του (πλάτος, φάση) με τα χαρακτηριστικά της απόκρισης του πραγματικού παλμικού σήματος.

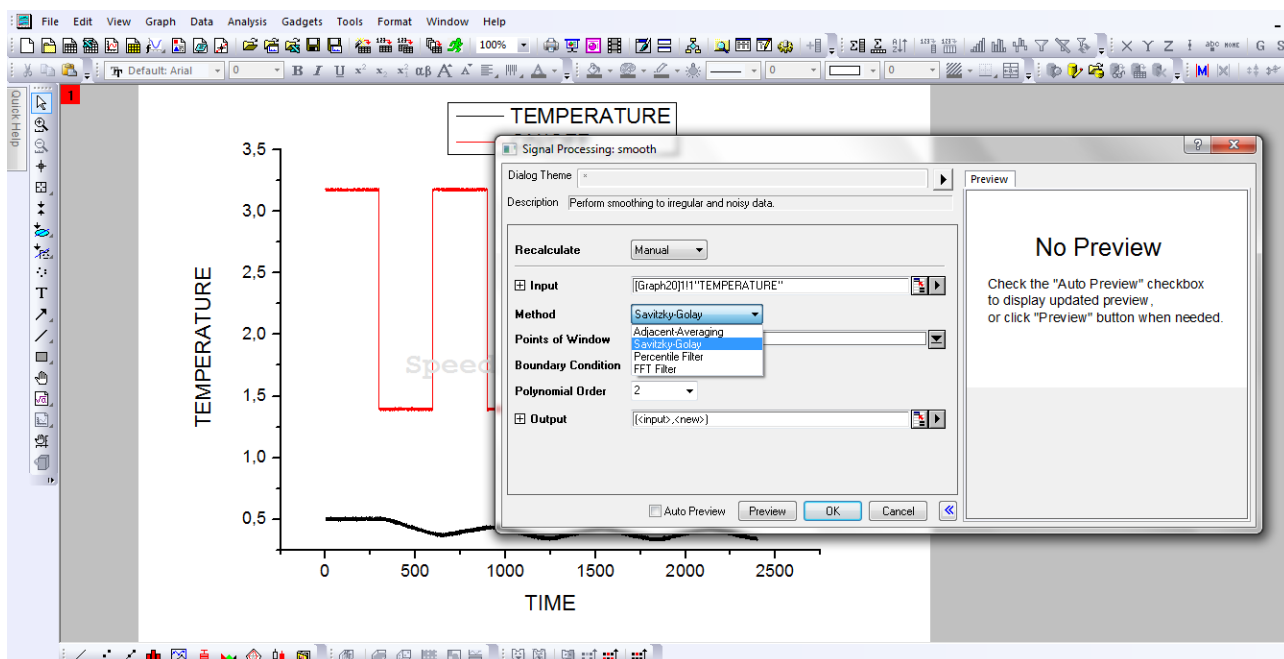
Με δεδομένη τη χρονική σταθερά  $\tau$  και την αναλυτική σχέση 2.33 του δεύτερου κεφαλαίου, προέκυψε ο υπολογισμός του συντελεστή  $[1 + (\omega \cdot \tau)^2]^{1/2}$  του περιοδικού όρου της ημιτονοειδούς συνάρτησης απόκρισης για κάθε πείραμα μεταβαλλόμενης ισχύος εισόδου. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί ένα μέτρο της μείωσης του πλάτους ταλάντωσης της απόκρισης του συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως για ημιτονοειδή είσοδο. Ο υπολογισμός αυτός θεωρείται ότι γίνεται σε μεγάλες τιμές χρόνου ούτως ώστε ο μεταβατικός όρος  $C_1 \cdot e^{(-t/\tau)}$  της σχέσης 2.33 να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.



Στη συνέχεια, έγινε εισαγωγή των δεδομένων θερμοκρασίας για μεταβαλλόμενη ισχύ εισόδου στο λογισμικό υπολογισμού στον Η/Υ. Έπειτα από ομαλοποίηση των τιμών αυτών για εξάλειψη του θορύβου με τη μέθοδο *Savitzky- Golay*, δημιουργήθηκαν καινούργια διαγράμματα σήματος εισόδου-ισχύος και σήματος εξόδου-θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (Σχήματα 4.7a & 4.7b).

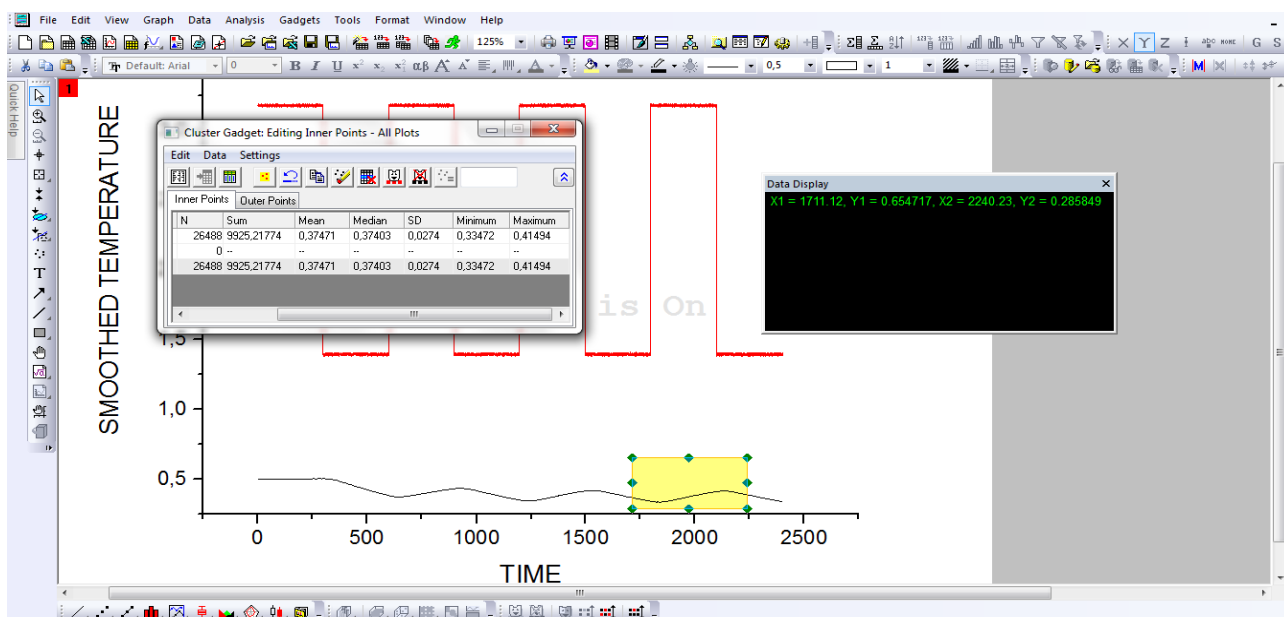


Σχήμα 4.7a Το αρχικό διάγραμμα εισαγόμενης ισχύος και θερμοκρασίας πυρήνα με τη παρουσία θορύβου



Σχήμα 4.7b Η επιλογή της μεθόδου *Savitzky-Golay* στο ειδικό λογισμικό για τη μείωση του θορύβου

Επιπλέον, μέσω της δυνατότητας για τον εντοπισμό ακρότατων τιμών σε μία καμπύλη του ειδικού λογισμικού, καταγράφηκαν οι μέσες τιμές των ανώτατων και κατώτατων σημείων για τους δύο, τρεις τελευταίους κάθε φορά κύκλους φόρτισης του συστήματος για κάθε σενάριο ώστε να υπάρχει καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις (Σχήμα 4.8).

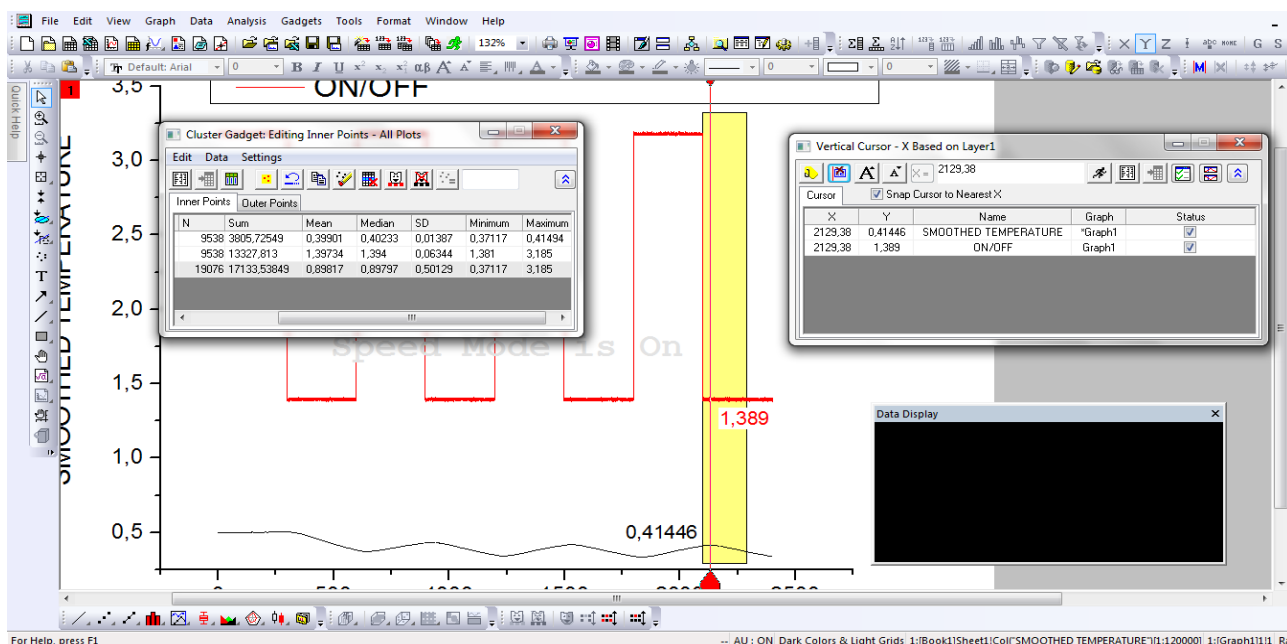


Σχήμα 4.8 Εύρεση των ακρότατων τιμών για το πλάτος γραφικά με τη βοήθεια του ειδικού προγράμματος

Κι εδώ, οι μετρήσεις έγιναν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές χρόνου προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο μεταβατικός όρος της σχέσης 2.33. Στη συνέχεια υπολογίζονται η διαφορά αυτών των ακρότατων τιμών και διαιρούνται με το μέγιστο θεωρητικό πλάτος της ταλάντωσης ( $x_0 - x_\infty$ ), με σκοπό να υπολογιστεί ο πραγματικός συντελεστής μείωσης του πλάτους του σήματος απόκρισης. Τέλος, ακολούθησε σύγκριση μεταξύ των πραγματικών και θεωρητικών συντελεστών μείωσης.

Η μελέτη της φάσης της απόκρισης του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά, υπολογίστηκε θεωρητικά από τη σχέση 2.34 του δεύτερου κεφαλαίου η διαφορά φάσης για την προσομοιωμένη ημιτονοειδή είσοδο.

Ακολούθως, από τα διαγράμματα του πραγματικού παλμικού σήματος εισόδου-ισχύος και του σήματος εξόδου-θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο έγινε γραφική μελέτη της φασικής διαφοράς των δύο σημάτων. Αυτό, βέβαια κατέστη δυνατό μέσω της χρήσης των επιλογών **Vertical Cursor** και **Cluster** του ειδικού λογισμικού υπολογισμών, όπου βρέθηκαν τα ακριβή χρονικά σημεία στα οποία το κάθε σήμα παρουσίαζε ακρότατο. Ο υπολογισμός της απόστασης του ακρότατου του κάθε σήματος σε σχέση με το άλλο κατά μήκος του άξονα του χρόνου, οδήγησε στην εύρεση της χρονικής διαφοράς φάσης τους, η οποία μετατράπηκε αυτομάτως σε γωνιακή διαφορά γνωρίζοντας τη περίοδο του εκάστοτε πειράματος (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 Εύρεση των ακρότατων τιμών για τη διαφορά φάσης γραφικά μέσω του ειδικού προγράμματος

Ο τρίτος τρόπος υπολογισμού της διαφοράς φάσης των δύο σημάτων ήταν με τη μέθοδο του μετασχηματισμού *Fourier* (*Fast Fourier Transform*) πάλι στο ειδικό υπολογιστικό πρόγραμμα. Αναλυτικά, η διαδικασία που έλαβε χώρα ήταν εξής:

**a)** από τις στήλες δεδομένων του σήματος εισόδου και εξόδου του συστήματος έγινε αποκοπή κι επικόλληση σε νέο φύλλο των τελευταίων καταγεγραμμένων περιόδων ούτως ώστε να υπάρχουν αρκετοί κι όμοια επαναλαμβανόμενοι κύκλοι για τον μετασχηματισμό *Fourier* του κάθε σήματος

**b)** μετασχηματισμός του πραγματικού παλμικού σήματος εισόδου- ισχύος στο πεδίο συχνοτήτων μέσω *FFT*

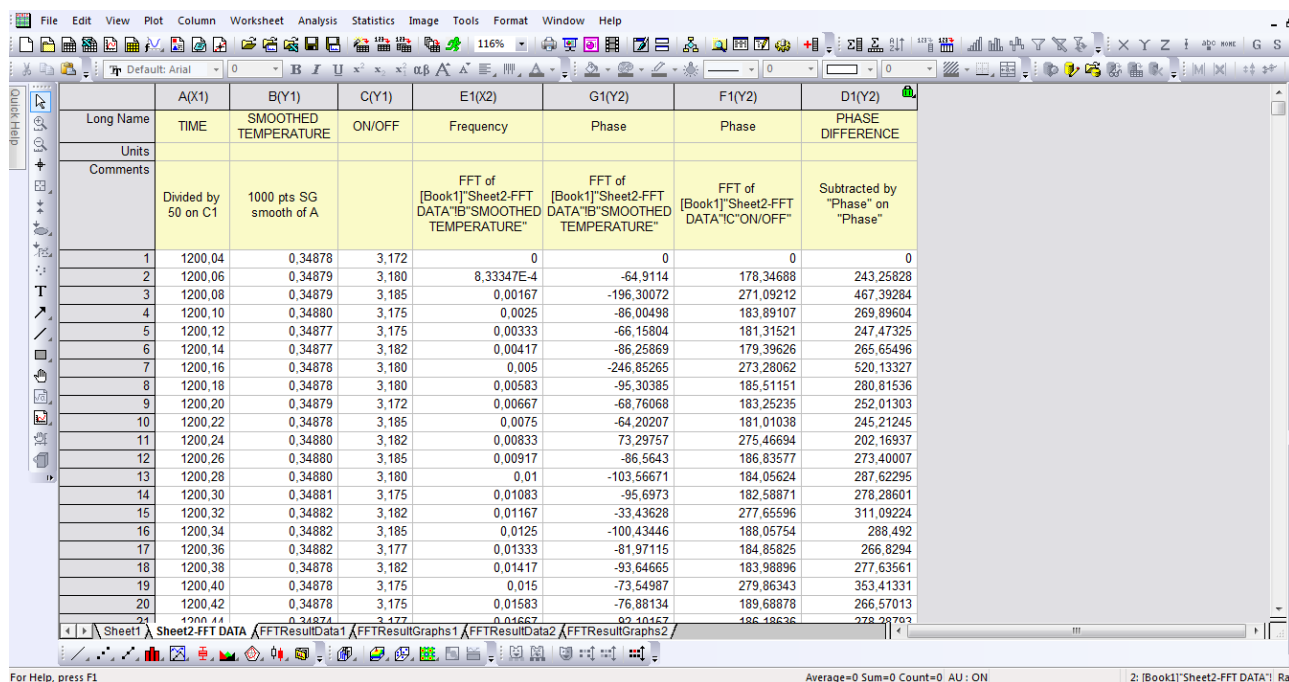
**c)** μετασχηματισμός του σήματος εξόδου- θερμοκρασίας στο πεδίο συχνοτήτων μέσω *FFT*

**d)** από τις καρτέλες *FFTResultData1* και *FFTResultData2* έγινε αφαίρεση των στηλών φάσης (*Phase*) των δύο σημάτων και τα αποτελέσματα καταχωρήθηκαν σε νέα στήλη η οποία ονομάστηκε *PHASE DIFFERENCE*

**e)** η παραπάνω καινούργια στήλη αναπαραστάθηκε στο εύρος των συχνοτήτων σε διάγραμμα *PHASE DIFFERENCE- FREQUENCY*

**f)** μέσω της επιλογής *Vertical Cursor* που αναφέρθηκε προηγουμένως, βρέθηκε η ακριβής γωνιακή διαφορά φάσης των δύο σημάτων στην εξεταζόμενη συχνότητα

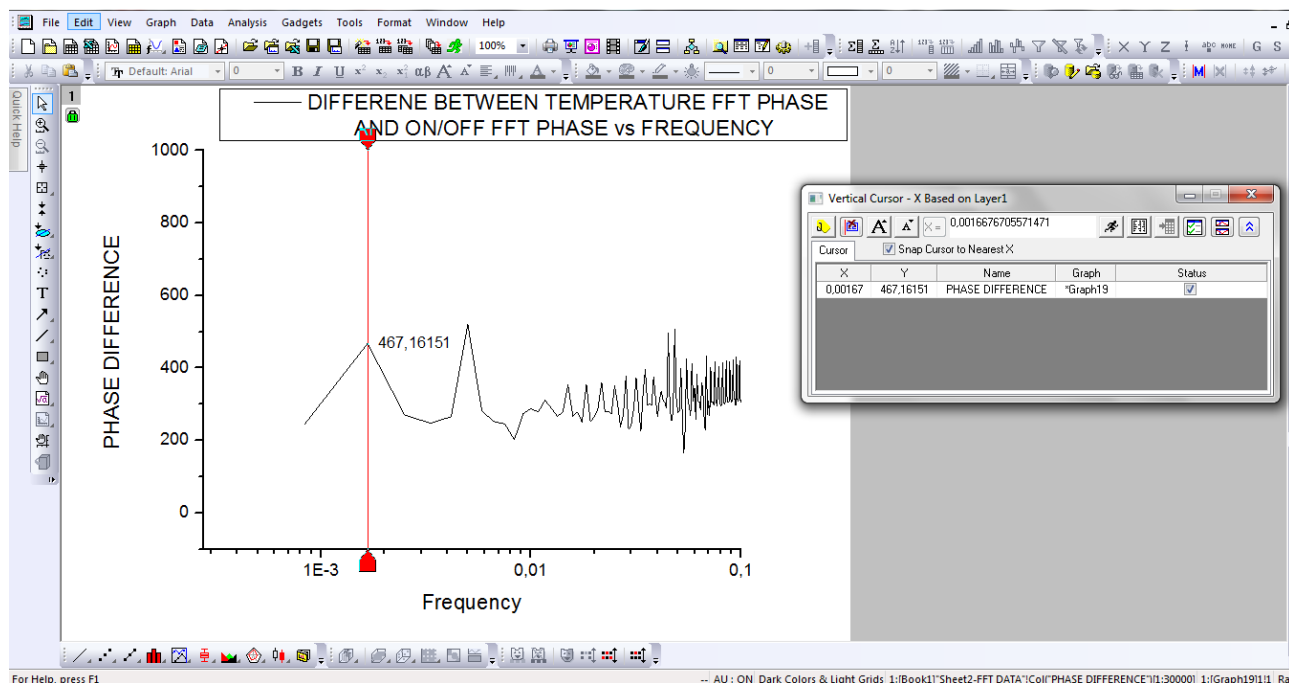
Τα παραπάνω βήματα υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα συμβάλλοντας στην εύρεση της γωνιακής διαφοράς φάσης κάθε φορά (Εικόνα 4.8 & Σχήμα 4.10).



	A(X1)	B(Y1)	C(Y1)	E1(X2)	G1(Y2)	F1(Y2)	D1(Y2)
Long Name	TIME	SMOOTHED TEMPERATURE	ON/OFF	Frequency	Phase	Phase	PHASE DIFFERENCE
Units							
Comments	Divided by 50 on C1	1000 pts SG smooth of A		FFT of [Book1]Sheet2-FFT DATA"TEMP"SMOOTHED TEMPERATURE"	FFT of [Book1]Sheet2-FFT DATA"TEMP"SMOOTHED TEMPERATURE"	FFT of [Book1]Sheet2-FFT DATA"ON/OFF"	Subtracted by "Phase" on "Phase"
1	1200.04	0.34878	3.172	0	0	0	0
2	1200.06	0.34879	3.180	8.33347E-4	-64.9114	178.34688	243.25828
3	1200.08	0.34879	3.185	0.00167	-196.30072	271.09212	467.39284
4	1200.10	0.34880	3.175	0.0025	-86.00498	183.89107	269.89604
5	1200.12	0.34877	3.175	0.00333	-66.15804	181.31521	247.47325
6	1200.14	0.34877	3.182	0.00417	-86.25869	179.39626	265.65496
7	1200.16	0.34878	3.180	0.005	-246.85265	273.28062	520.13327
8	1200.18	0.34878	3.180	0.00583	-95.30385	185.51151	280.81536
9	1200.20	0.34879	3.172	0.00667	-68.76068	183.25235	252.01303
10	1200.22	0.34878	3.185	0.0075	-64.20207	181.01038	245.21245
11	1200.24	0.34880	3.182	0.00833	73.29757	275.46694	202.16937
12	1200.26	0.34880	3.185	0.00917	-86.5643	186.83577	273.40007
13	1200.28	0.34880	3.180	0.01	-103.56671	184.05624	287.62295
14	1200.30	0.34881	3.175	0.01083	-95.6973	182.58871	278.28601
15	1200.32	0.34882	3.182	0.01167	-33.43628	277.65596	311.09224
16	1200.34	0.34882	3.185	0.0125	-100.43446	188.05754	288.492
17	1200.36	0.34882	3.177	0.01333	-81.97115	184.85825	266.8294
18	1200.38	0.34878	3.182	0.01417	-93.64665	183.98896	277.63661
19	1200.40	0.34878	3.175	0.015	-73.54987	279.86343	353.41331
20	1200.42	0.34878	3.175	0.01583	-76.88134	189.68878	266.57013
21	1200.44	0.34874	3.177	0.01667	92.10167	186.18636	278.28793

Εικόνα 4.8 Οι στήλες δεδομένων που προέκυψαν από τη χρήση της μεθόδου του μετασχηματισμού *Fourier*





Σχήμα 4.10 Η εύρεση της διαφοράς φάσης των σημάτων μέσω *FFT*

#### **4.4 Ψυκτική απόδοση του *heat pipe* ανάλογα με τον προσανατολισμό**

Η τελευταία περίπτωση θερμικής συμπεριφοράς του πυρήνα που μελετήθηκε αφορούσε τη ψυκτική απόδοση του *heat pipe* σε διαφορετικούς προσανατολισμούς της πειραματικής διάταξης.

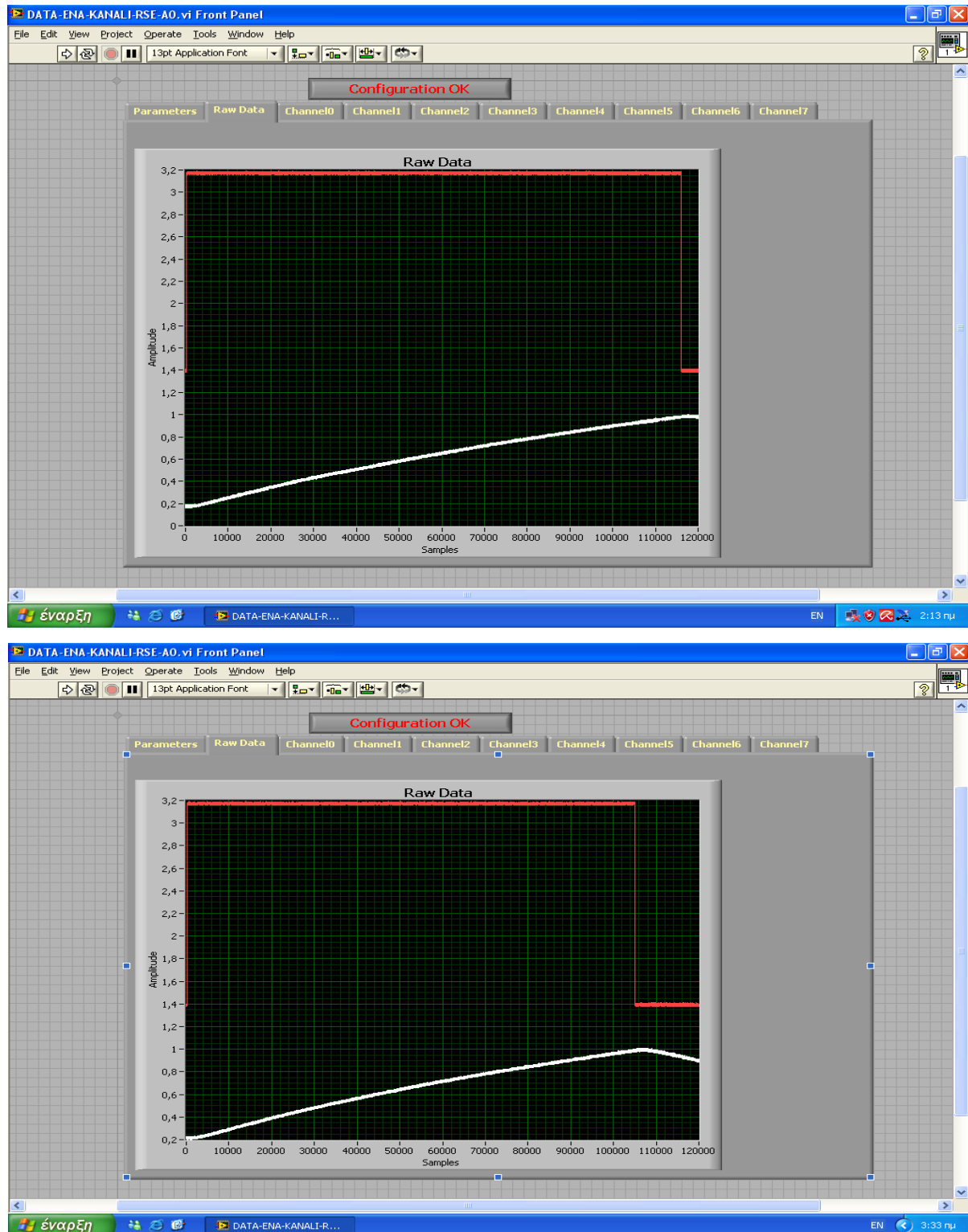
Στα εκτελεσθέντα πειράματα, το χάλκινο δοκίμιο μετέβαινε σε μία προκαθορισμένη υψηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια διακοπτόταν η παροχή ισχύος στο σύστημα. Τη στιγμή εκείνη κι ενώ ο ανεμιστήρας βρισκόταν συνεχώς σε μόνιμη λειτουργία τάσεως 6 *Volts*, ξεκινούσε η καταγραφή των τιμών θερμοκρασίας του πυρήνα (*LABVIEW*) μέχρι τη τελική ψύξη του συστήματος. Κατά τη διαδικασία της ψύξης, ο προσανατολισμός του μοντέλου προσομοίωσης μεταβαλλόταν με σκοπό να δημιουργηθούν διαγράμματα στα οποία θα διαφαινόταν η συσχέτισή του με την κλίση μείωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα. Αναλυτικά παραδείγματα τέτοιων διαγραμμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σύγκρισης θα παρουσιασθούν στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας.

## Κεφάλαιο 5 Πειραματικά Αποτελέσματα & Σχολιασμός

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά σε παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας εργασίας. Παρουσιάζονται με μεγάλη λεπτομέρεια τα τελικά δεδομένα και πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών των μετρήσεων τόσο με τη παράθεση αριθμητικών όρων όσο και γραφικά. Για την διευκόλυνση του αναγνώστη, ένα μεγάλο πλήθος διαγραμμάτων και πινάκων παρατίθενται στις επόμενες σελίδες του κεφαλαίου.

Αρχικά, κρίνεται απαραίτητο να επισημανθούν ορισμένα σχόλια επί της διεξαγωγής των πειραμάτων. Πριν την έναρξη των μετρήσεων, θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνουν κάποιες διερευνητικές δειγματοληψίες τόσο για τον απαιτούμενο πραγματικό χρόνο μετάβασης του συστήματος στη κατάσταση θερμικής ισορροπίας όσο και για την ικανότητα του *heat pipe* να απάγει τη θερμότητα του πυρήνα σε διάφορες τιμές ισχύος του *soldering iron*. Επίσης, έγινε μελέτη του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος για να φθάσει το σύστημα σε σταθερή κατάσταση κατά τη διάρκεια μεταβαλλόμενης φόρτισης του τόσο από κατάσταση ψυχρής εκκίνησης όσο κι από κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Από την εφαρμογή των παραπάνω δοκιμαστικών μεθοδολογιών και μετρήσεων, μέσω της εφαρμογής *Raw Data* του *LABVIEW* εξήχθησαν οι παρακάτω διαπιστώσεις, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν σαν βάση για τη διεξαγωγή των κυρίως μετρήσεων της εργασίας.

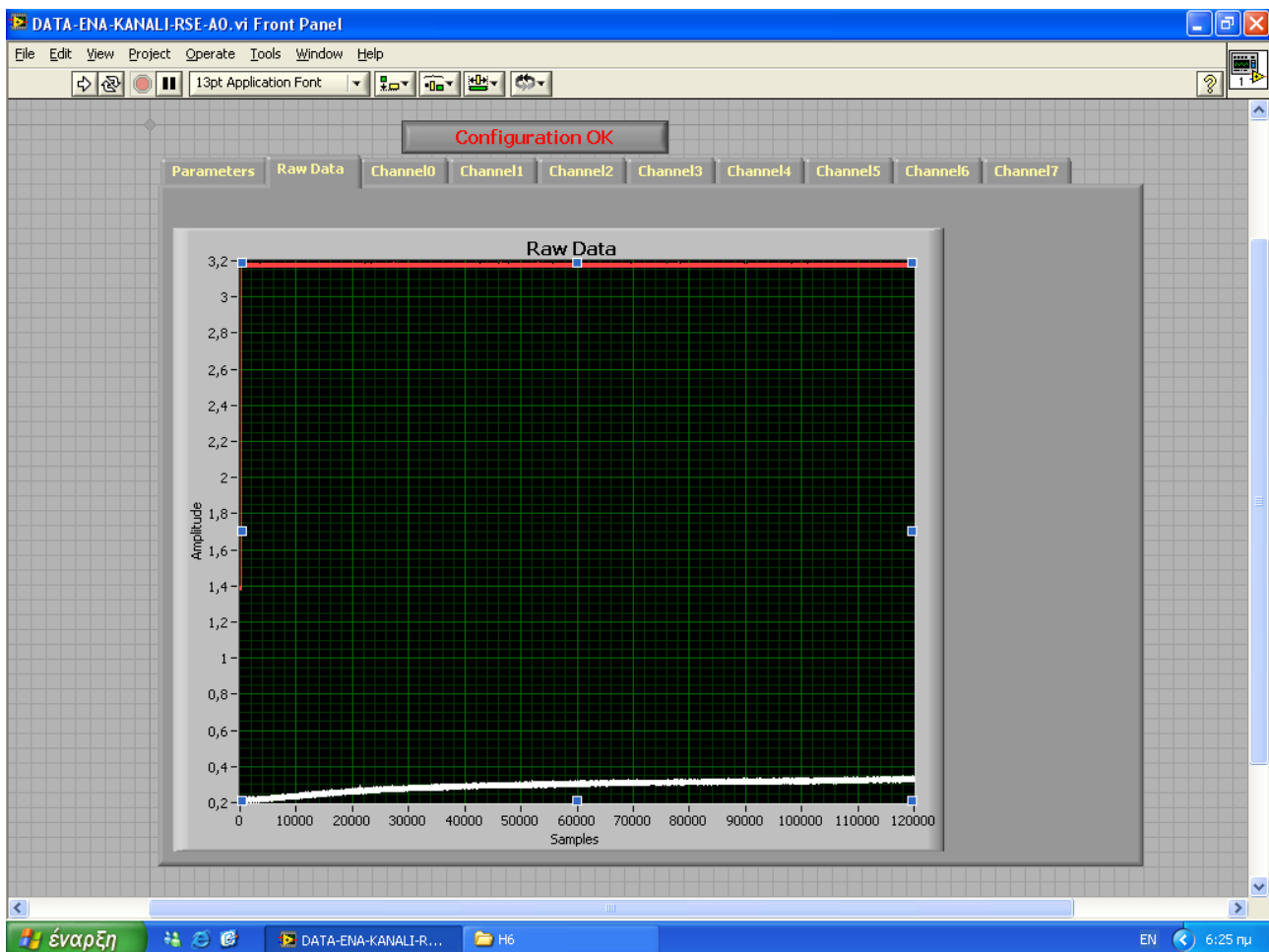
- Στα πειράματα με τον προσανατολισμό της όλης διάταξης σε οριζόντιο επίπεδο και μέγιστη ισχύ εισόδου στο σύστημα ( $48 \text{ Watt}$ ), παρατηρήθηκε δραματική αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα ( $> 100^\circ\text{C}$ ) το οποίο επέβαλε τη διακοπή της παροχής ισχύος (Εικόνα 5.1). Αυτό έγινε, ώστε να προληφθούν διάφορα φαινόμενα υπερθέρμανσης του πυρήνα με συνέπεια τη δημιουργία επισφαλούς κατάστασης και την ενδεχόμενη πρόκληση βλάβης (κίνδυνος ανάφλεξης) στην όλη διάταξη. Στη παραπάνω περίπτωση, δοκιμάστηκε, επίσης, η πλήρης αναστροφή του *soldering iron* από το κάτω τμήμα της διάταξης στο επάνω (περιστροφή κατά  $180^\circ$ ) με τον προσανατολισμό του *heat pipe* να παραμένει πάντοτε σε οριζόντια διεύθυνση.



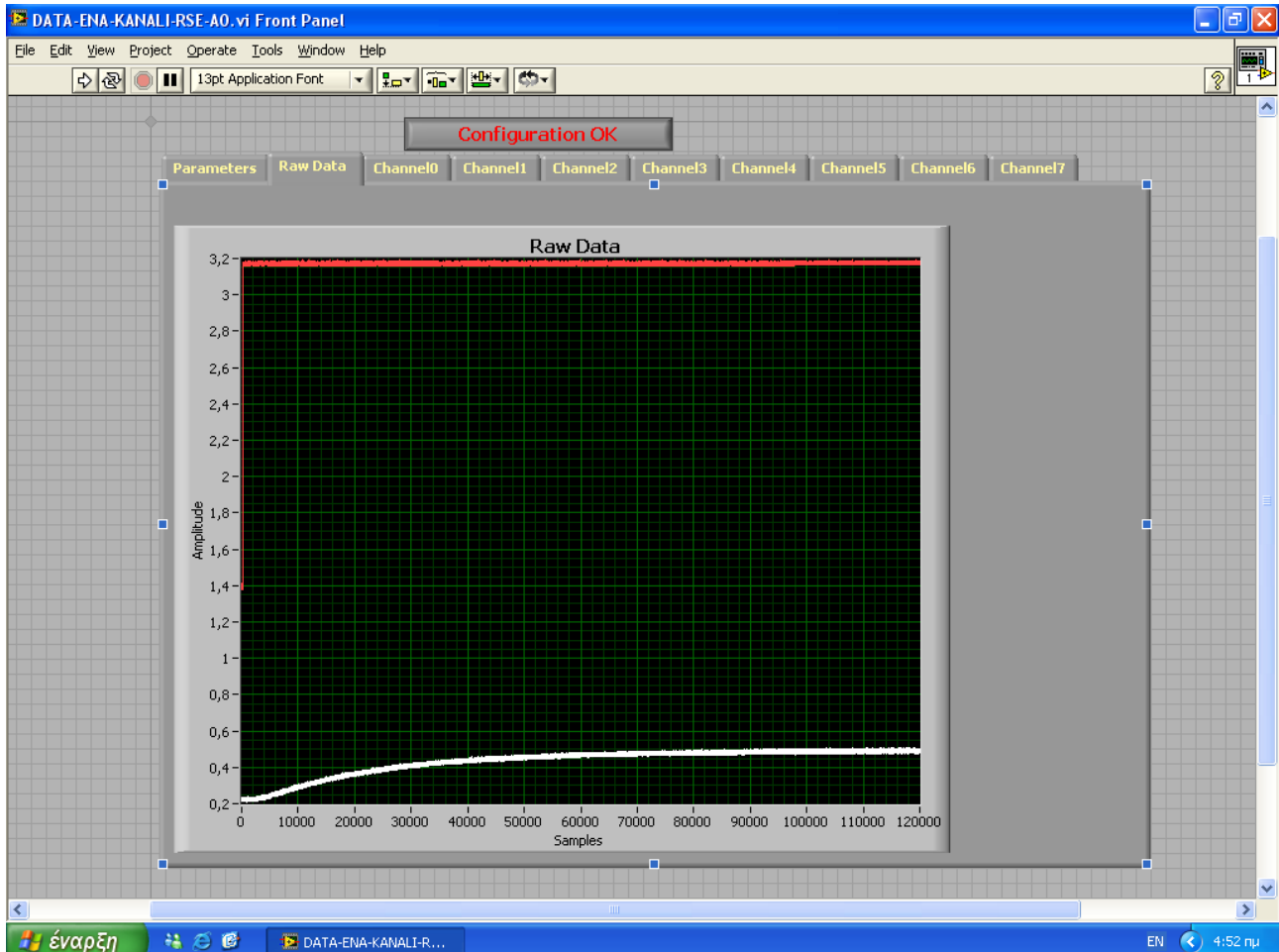
Εικόνα 5.1 Η ραγδαία αύξηση θερμοκρασίας του πυρήνα με το *heat pipe* τοποθετημένο οριζόντια και το *soldering iron* στο επάνω και το κάτω τμήμα της διάταξης σε κάθε περίπτωση

Η παραπάνω εικόνα (Εικόνες 5.1a & 5.1b) επιβεβαιώνει τον προαναφερθέντα ισχυρισμό και γι' αυτόν το λόγο, όλα τα σενάρια θέρμανσης του πυρήνα με οριζόντιο προσανατολισμό του *heat pipe* πραγματοποιήθηκαν με τη μισή τιμή της μέγιστης ισχύος εισόδου (24 Watt). Σε αυτά τα επίπεδα ισχύος το σύστημα οδηγούνταν σε θερμική ισορροπία με ασφαλείς τιμές θερμοκρασίας του πυρήνα ( $< 80^{\circ}\text{C}$ ).

- Σε όλες τις περιπτώσεις των *COLDSTART*, ο χρόνος μετάβασης του συστήματος σε θερμική ισορροπία δεν ήταν ο ίδιος. Αυτό που φάνηκε από τις συγκεκριμένες δοκιμαστικές μετρήσεις ήταν ότι απαιτούνταν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για τον πυρήνα να ισορροπήσει όταν δέχονταν μειωμένη ισχύ εισόδου (24 Watt) απ' ό,τι όταν λειτουργούσε σε μέγιστη (48 Watt). Αυτό είναι ξεκάθαρο στα επόμενα διαγράμματα (Εικόνα 5.2), όπου η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του πυρήνα απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο στο σενάριο 24WH6COLDSTART απ' ό,τι στο σενάριο V6COLDSTART.



Εικόνα 5.1a Διάγραμμα θερμοκρασίας ισορροπίας του πυρήνα για το 24WH6COLDSTART



Εικόνα 5.1b Διάγραμμα θερμοκρασίας ισορροπίας του πυρήνα για το V6COLDSTART

Τελικά, αποφασίστηκαν ως ικανοποιητικοί χρόνοι δειγματοληψίας τα 60 min (50 Hz, 180000 samples) για τα πειράματα COLDSTART με ισχύ εισόδου 24 Watt και αντίστοιχα τα 40 min (50 Hz, 120000 samples) για τα πειράματα COLDSTART με ισχύ εισόδου 48 Watt.

- Τέλος, για όλες τις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης ισχύος εισόδου στο σύστημα αποφασίστηκε η θερμοκρασία έναρξης επιβολής του εναλλασσόμενου φορτίου να είναι για κάθε σενάριο αυτή της θερμικής ισορροπίας στην αντίστοιχη ισχύ εισόδου (24 ή 48 Watt) (ακριβώς αμέσως μετά από το πέρας διεξαγωγής των COLDSTART). Αυτό έγινε με σκοπό το σημείο έναρξης όλων των σεναρίων να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερό κατά την εκκίνηση, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη μεταγενέστερη σύγκριση των σημάτων για τις διαφορετικές συχνότητες εισόδου. Η εφαρμογή του εναλλασσόμενου φορτίου ισχύος θα μπορούσε να ξεκινά κι από κάποιο ψυχρό σημείο θερμοκρασίας του πυρήνα



αλλά σ' αυτήν τη περίπτωση ο προσδιορισμός αυτού του σημείου δεν θα ήταν εξίσου ακριβής με το αντίστοιχο σημείο θερμικής ισορροπίας, δυσχεραίνοντας έτσι τη τελική σύγκριση. Επιπρόσθετα, ξεκινώντας από τη θερμή κατάσταση (*WARM state*) παρατηρήθηκε ότι απαιτούνταν λιγότερος χρόνος για να φτάσει το σύστημα σε σταθερή κατάσταση, γεγονός το οποίο βοήθησε στη εξοικονόμηση εργαστηριακού χρόνου στο ήδη χρονοβόρο κι απαιτητικό πρόγραμμα μετρήσεων.

### 5.1 Υπολογισμός του χρόνου διάχυσης

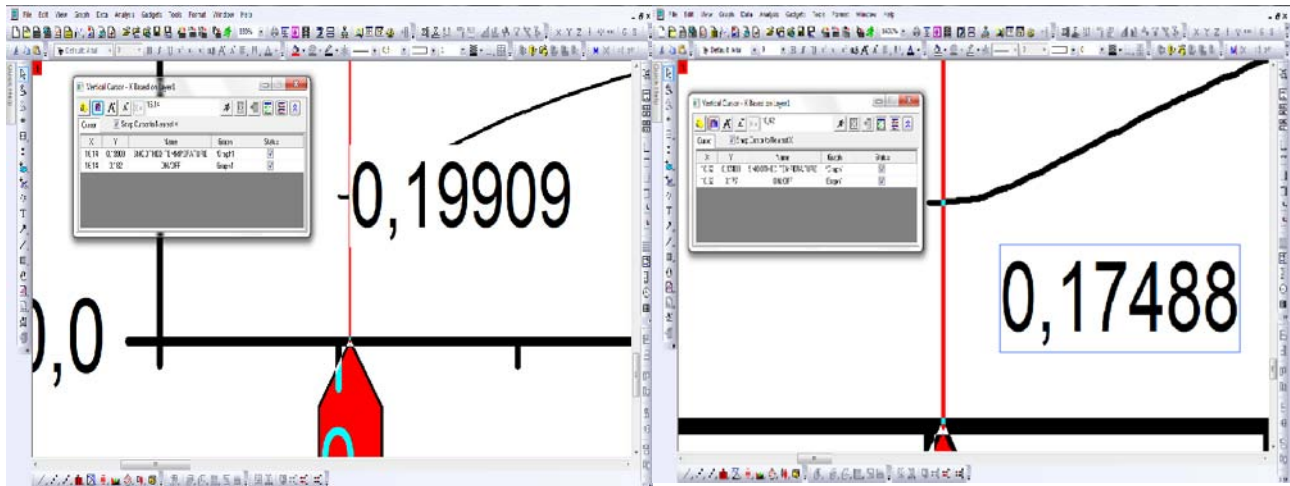
Ο υπολογισμός του χρόνου διάχυσης πραγματοποιήθηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο τέταρτο κεφάλαιο, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.13 του δεύτερου κεφαλαίου και κάνοντας τους υπολογισμούς για προσεγγιστική απόσταση κορυφής δοκιμίου πυρήνα-ακροδέκτη *soldering iron*  $\Delta x = 32 \text{ mm} = 0,032 \text{ m}$  (από το μέσο βάθος του εμφυτευμένου *soldering iron tip* μέχρι το άκρο του θερμοστοιχείου) και για συντελεστή θερμικής διαχυτότητας του χαλκού  $\alpha = 113 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$ , προκύπτει ο εκτιμώμενος χρόνος θερμικής διάχυσης από το άκρο του *soldering iron* στη κορυφή του δοκιμίου ως:

$$\Delta t = \frac{(\Delta x)^2}{\alpha} = \frac{0,032^2}{113 \times 10^{-6}} = 9,06 \text{ sec}$$

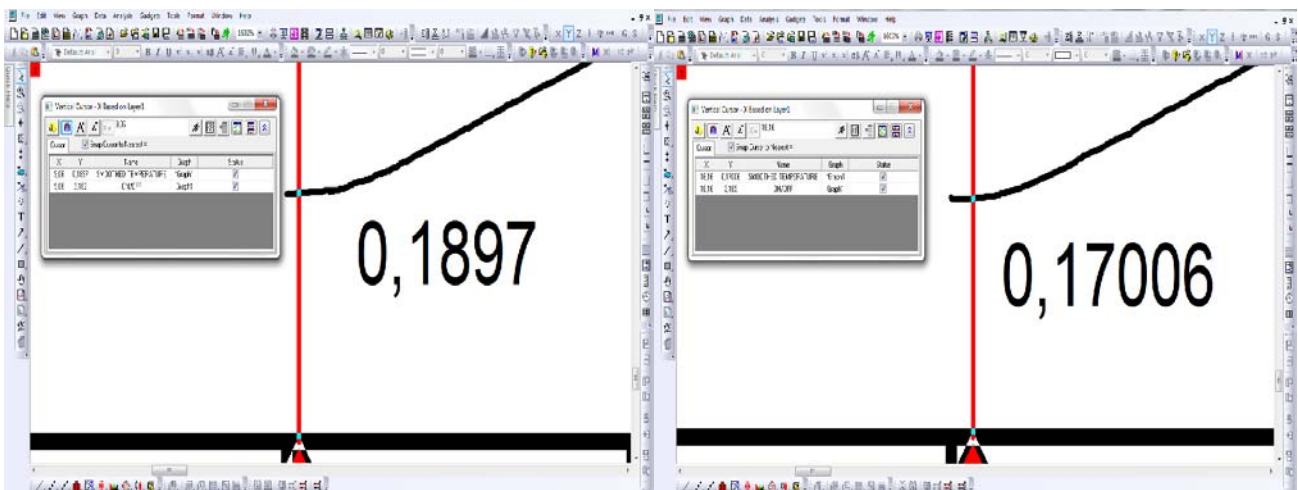
Η πειραματική μελέτη του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας  $\alpha$  έλαβε χώρα στα πειράματα *COLDSTART*. Μόνο σε αυτά μπορούσε να υπολογιστεί μέσω των διαγραμμάτων του ειδικού υπολογιστικού πακέτου γραφικά ο χρόνος διάχυσης της θερμότητας κατά μήκος του δοκιμίου με τη μεθοδολογία του τέταρτου κεφαλαίου (Υποενότητα 4.2).

Στη συνέχεια, γίνεται παράθεση των επεξεργασμένων διαγραμμάτων της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου (Εικόνες 5.3a & 5.3b & 5.3c) για όλες τις περιπτώσεις των ψυχρών εκκινήσεων (*COLDSTART*). Σε όλα τα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη λεπτομέρεια (εστίαση στο σημείο ενδιαφέροντος) τα πρώτα δευτερόλεπτα του κάθε πειράματος *COLDSTART*. Στις πρώτες αυτές στιγμές και με τη χρήση του **Vertical Cursor** επιλέγεται, στα πλαίσια που αυτό είναι εφικτό, το ακριβές σημείο στο οποίο αρχίζει η αύξηση της θερμοκρασίας.

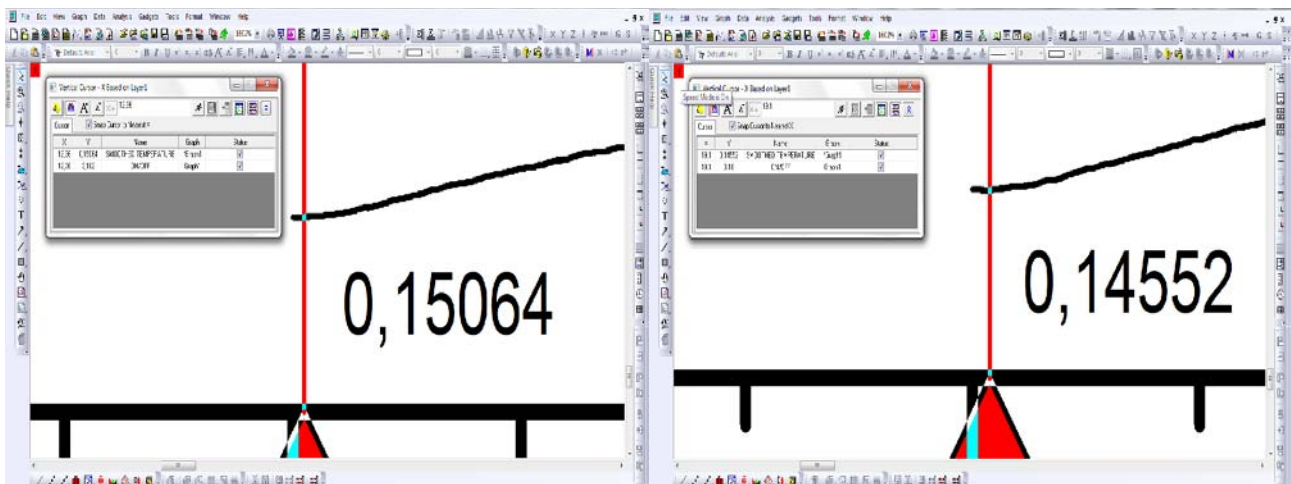




Εικόνα 5.3α Γραφική εύρεση χρόνου θερμικής διάχυσης σε V6COLDSTART1 & V6COLDSTART2



Εικόνα 5.3b Γραφική εύρεση χρόνου θερμικής διάχυσης σε V1-5COLDSTART1 & V1-5COLDSTART2



Εικόνα 5.3c Γραφική εύρεση χρόνου θερμικής διάχυσης σε 24WH6COLDSTART & 24WH1-5COLDSTART

Οι υπολογισμένες αυτές γραφικά τιμές συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) όπου και γίνεται υπολογισμός του μέσου όρου τους. Η λήψη του μέσου όρου είναι εφικτή διότι ο χρόνος θερμικής διάχυσης εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες, τη γεωμετρία και τη θερμοκρασία του υλικού τα οποία σε κάθε περίπτωση για τα αρχικά δευτερόλεπτα θέρμανσης του πυρήνα είναι ίδια.

Πειράματα <i><b>COLDSTART</b></i>	Χρόνος θερμικής διάχυσης πειράματος ( <i>sec</i> )	Μέσες τιμές χρόνου πειραμάτων ( <i>sec</i> )	Τελική πειραματική τιμή χρόνου θερμικής διάχυσης ( <i>sec</i> )
V6COLDSTART1	10,62	13,38	14,35
V6COLDSTART2	16,14		
V1-5COLDSTART1	9,06	12,61	
V1-5COLDSTART2	16,16		
24WH6COLDSTART	12,34	12,34	
24WH1-5COLDSTART	19,1	19,1	

Πίνακας 5.1 Τιμές του χρόνου διάχυσης της θερμότητας του πυρήνα για κάθε πείραμα *COLDSTART*

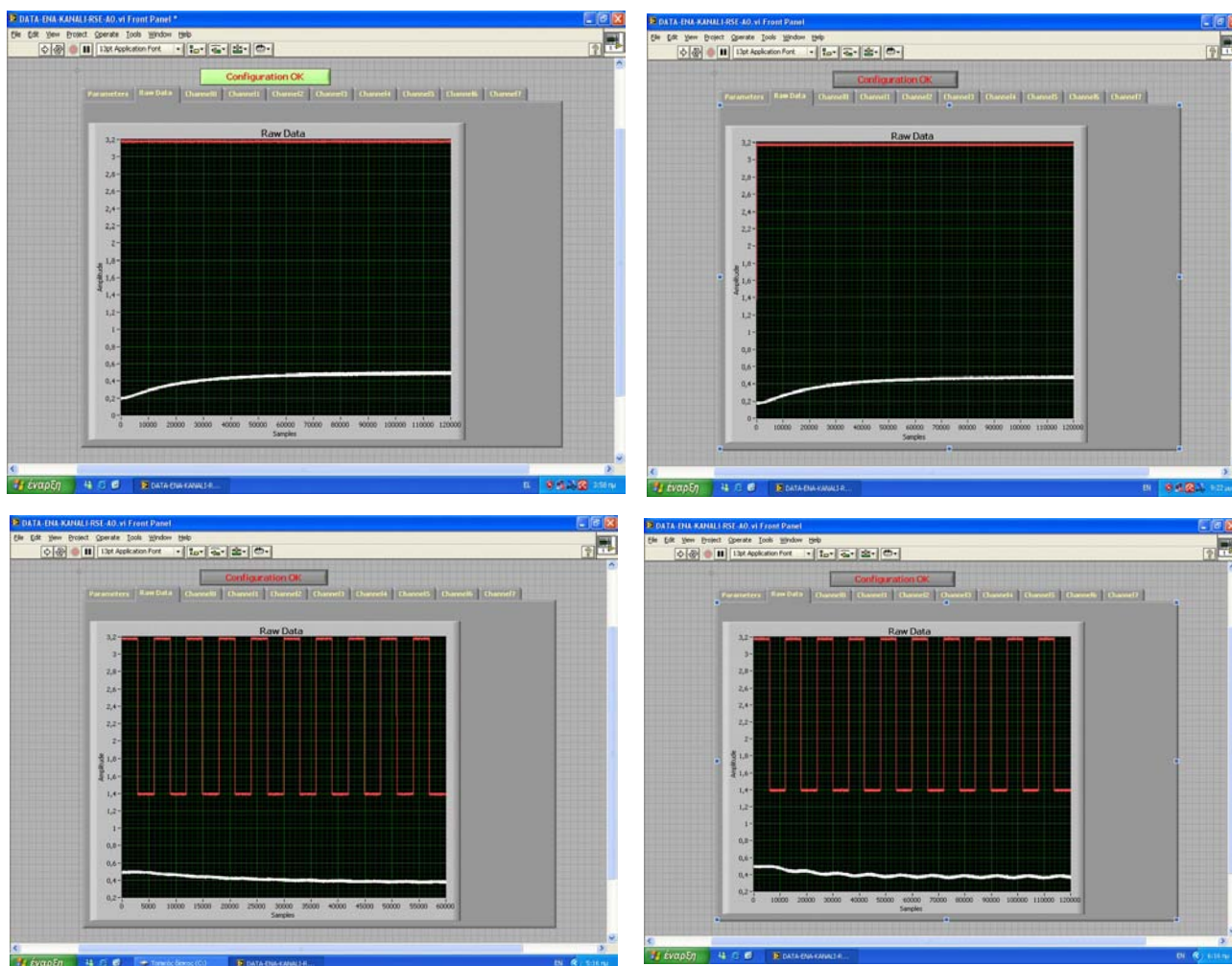
Στο συγκεντρωτικό πίνακα 5.1 διαφαίνεται μια απόκλιση στη κατανομή των τιμών η οποία αποδίδεται τόσο σε σφάλματα ανακρίβειας του αισθητήριου οργάνου όσο και στην αδυναμία της γραφικής επιλογής του ακριβούς επιθυμητού σημείου στο οποίο το θερμοστοιχείο “αισθάνεται” για πρώτη φορά μεταβολή στη θερμοκρασία. Η διαφορά δε της προκύπτουσας μέσης πειραματικής τιμής (14,35 sec) από τη θεωρητική (9,06 sec) αποδίδεται στην ύπαρξη του *soldering iron* για το οποίο απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα από τη στιγμή την οποία πλήττεται ο διακόπτης του *soldering station* μέχρι θερμότητα να διαχυθεί στην επιφάνεια του *soldering iron tip* για πρώτη φορά.

## 5.2 Μελέτη της απόκρισης της θερμοκρασίας του πυρήνα

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίστηκαν πειραματικά με τη χρήση των περιγραφόμενων αλγορίθμων και των κατάλληλων λογισμικών κι εργαλείων όλα τα μεγέθη (χρονική σταθερά  $\tau$ , πλάτος και διαφορά φάσης σημάτων) για τη κατανόηση της συμπεριφοράς της θερμοκρασίας του πυρήνα. Τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από μαθηματική όσο και γραφική ανάλυση ομαδοποιήθηκαν σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά.

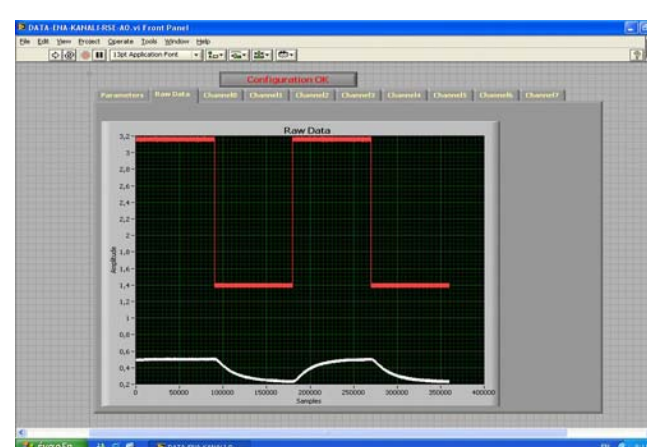
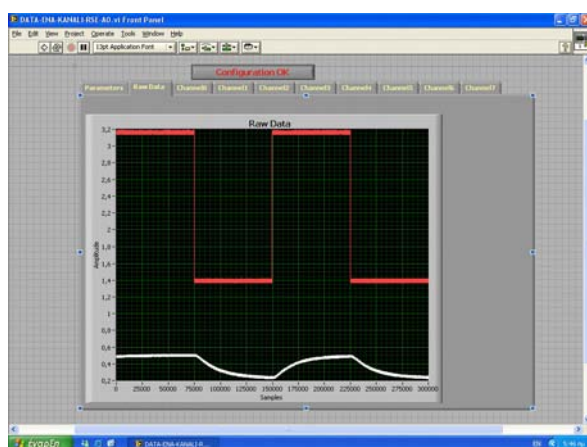
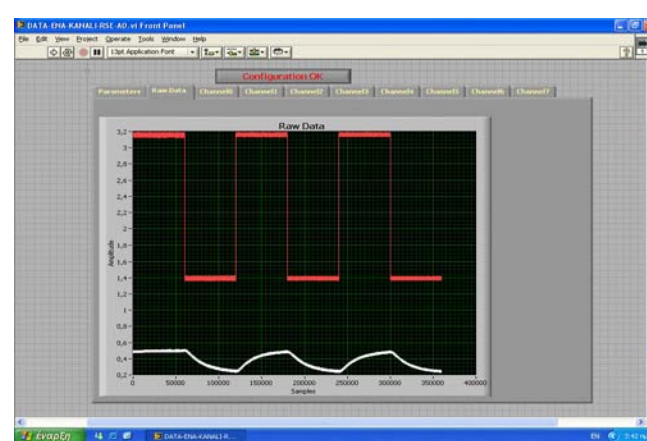
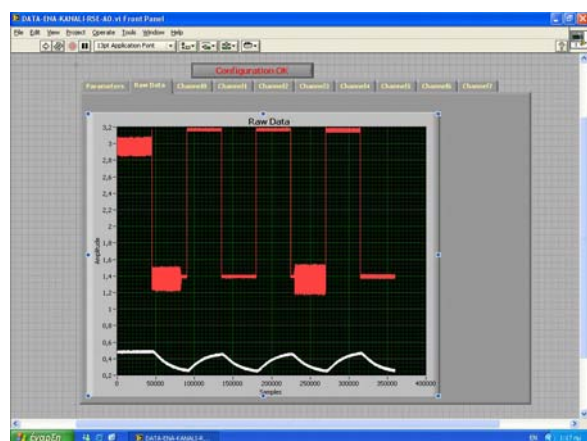
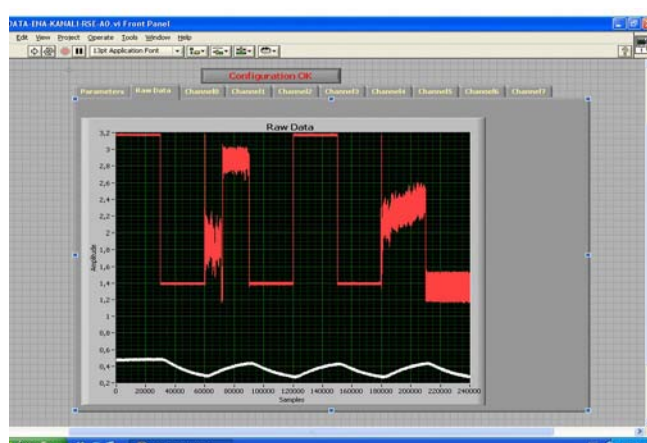
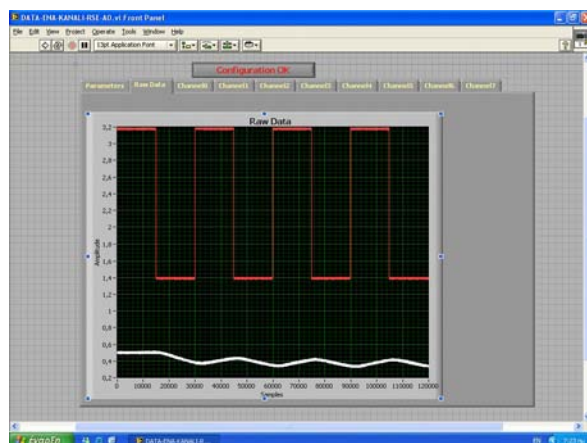
Τα πειράματα, όπως επισημάνθηκε, διεξήχθησαν για διάφορα σενάρια φόρτισης του πυρήνα [1M, 2M, 5M, 10M, 15M, 20M, 25M, 30M], με μεταβλητή ισχύ εισόδου στο σύστημα [24W, 48W], με διαφορετικό προσανατολισμό του αγωγού θερμότητας (οριζόντιος ή κάθετος) και διαφορετική τάση τροφοδοσίας του ανεμιστήρα [1,5V, 6V]. Μία συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των τελικών δεδομένων, πριν την επεξεργασία τους σε υπολογιστικό πακέτο, παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνες 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 & 5.9) με τη βοήθεια της επιλογής της καρτέλας *Raw Data* του λογισμικού *LABVIEW*. Αυτά τα διαγράμματα αποτελούν μία πρώτη ποιοτική απεικόνιση της θερμοκρασιακής απόκρισης του συστήματος καθώς και του πλήθους των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ V6:



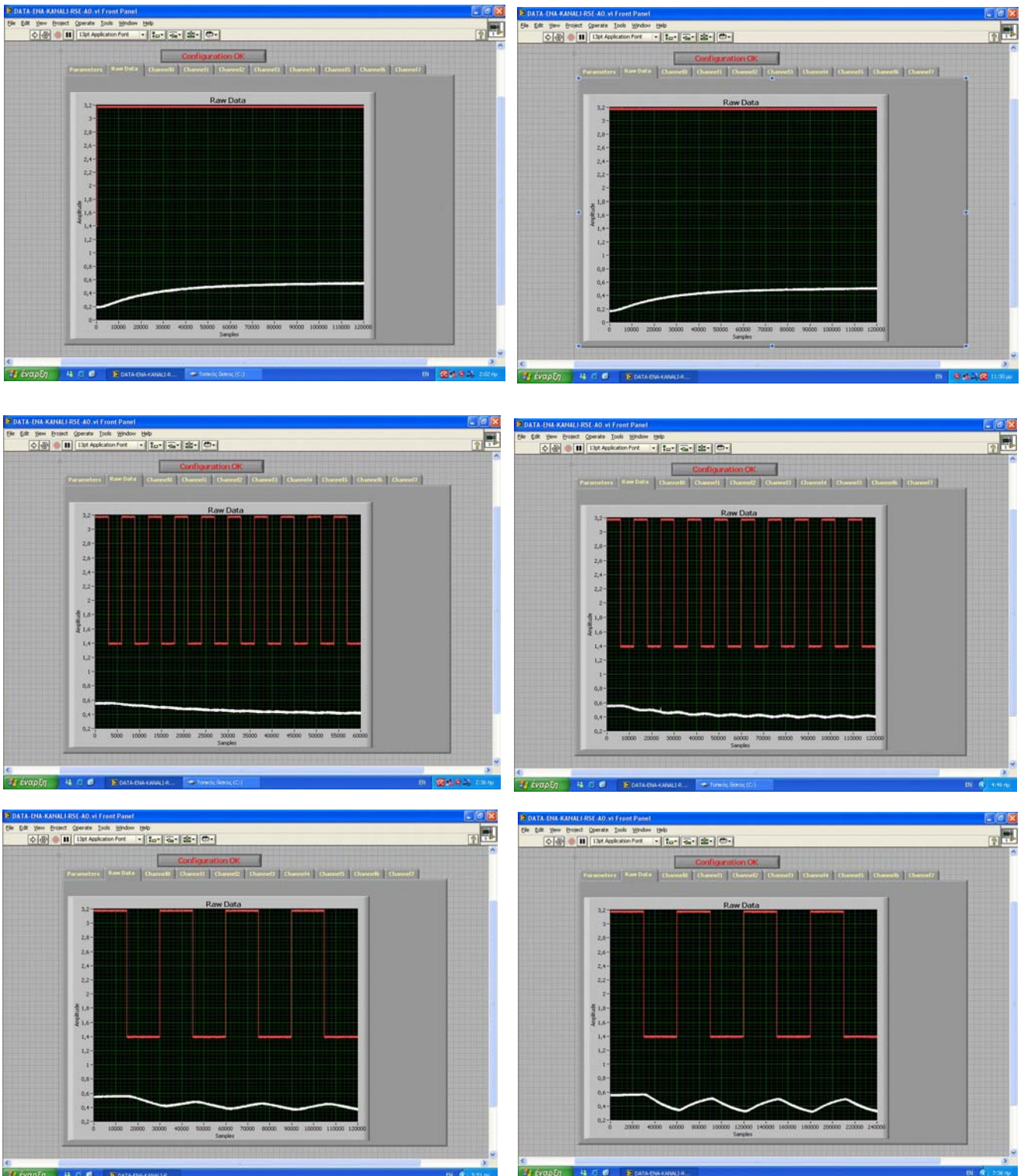
Εικόνα 5.4 Διαγράμματα *Raw Data* V6COLDSTART1, V6COLDSTART2, V61M & V62M





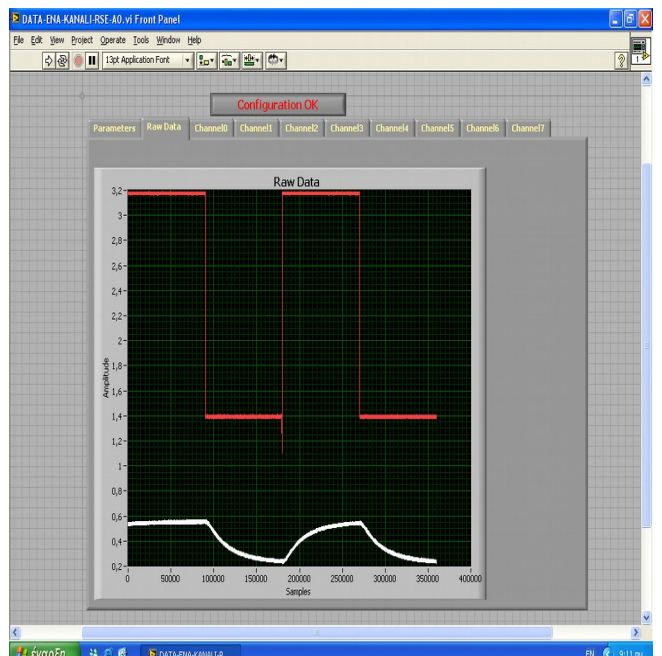
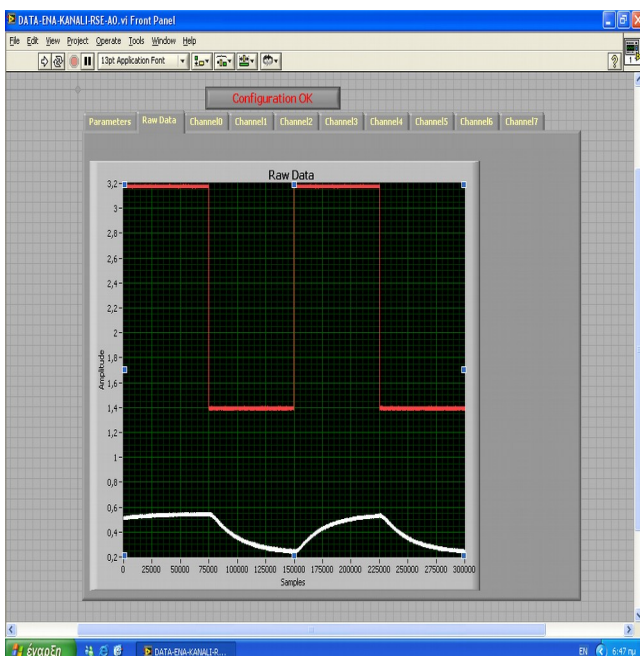
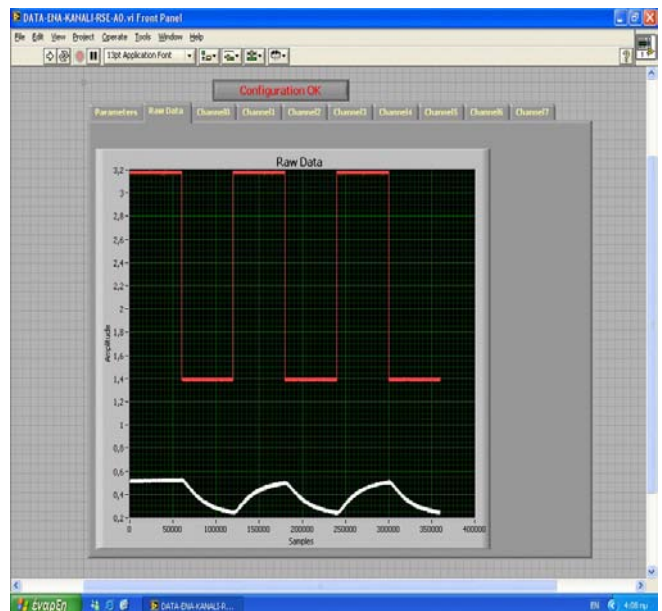
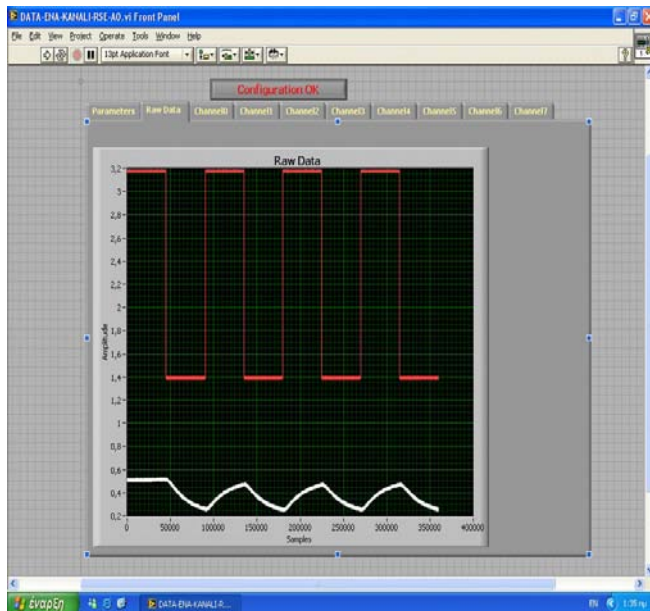
Εικόνα 5.5 Διαγράμματα *Raw Data* V65M, V610M, V615M, V620M, V625M & V630M

## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ V1,5:



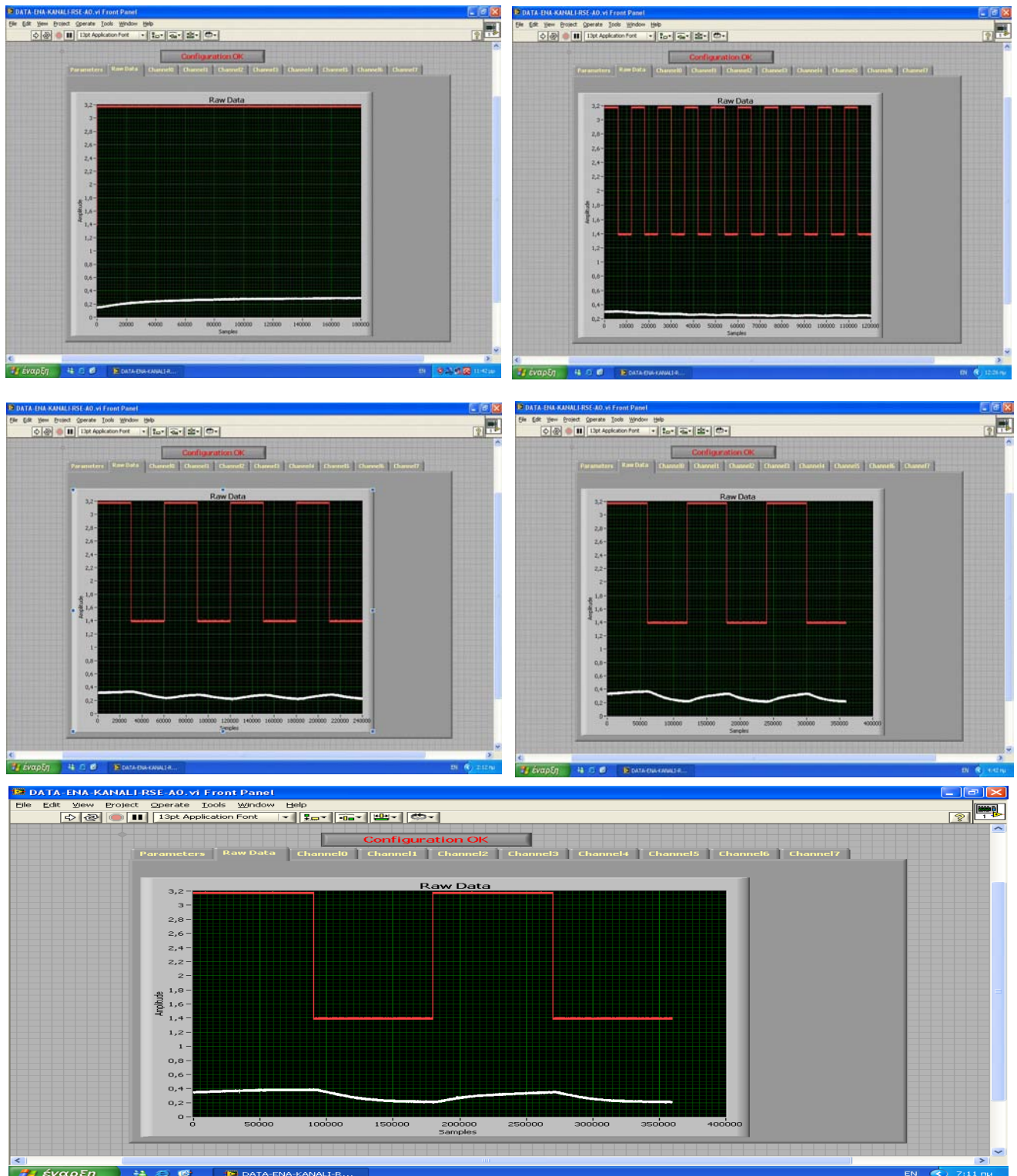
Εικόνα 5.6 Διαγράμματα Raw Data V1-5COLDSTART1, V1-5COLDSTART2, V1-51M, V1-52M, V1-55M & V1-510M





Εικόνα 5.7 Διαγράμματα *Raw Data* V1-515M, V1-520M, V1-525M & V1-530M

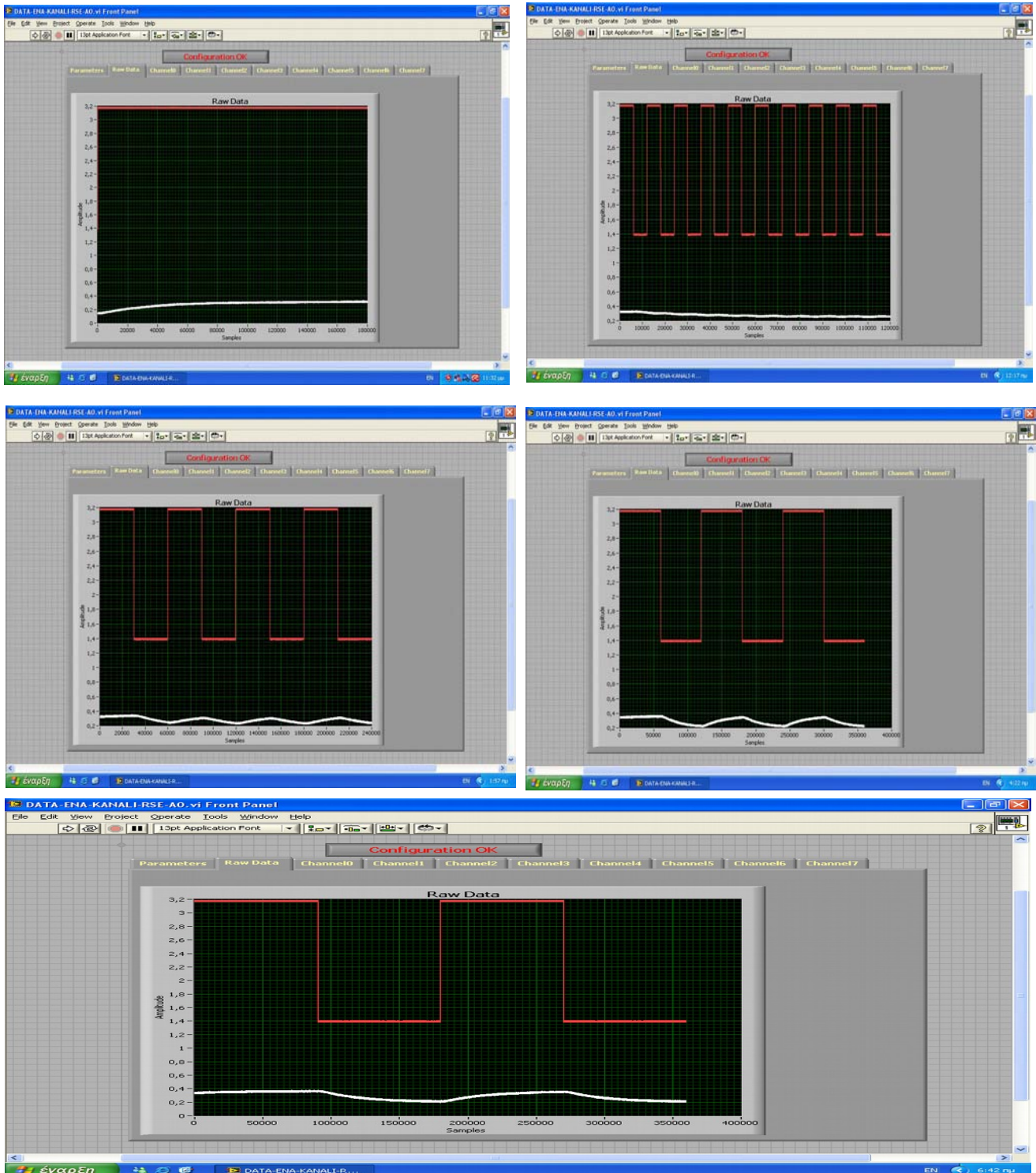
## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 24WH6:



Εικόνα 5.8 Διαγράμματα *Raw Data* 24WH6COLDSTART, 24WH62M, 24WH610M, 24WH620M & 24WH630M



## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 24WH1,5:



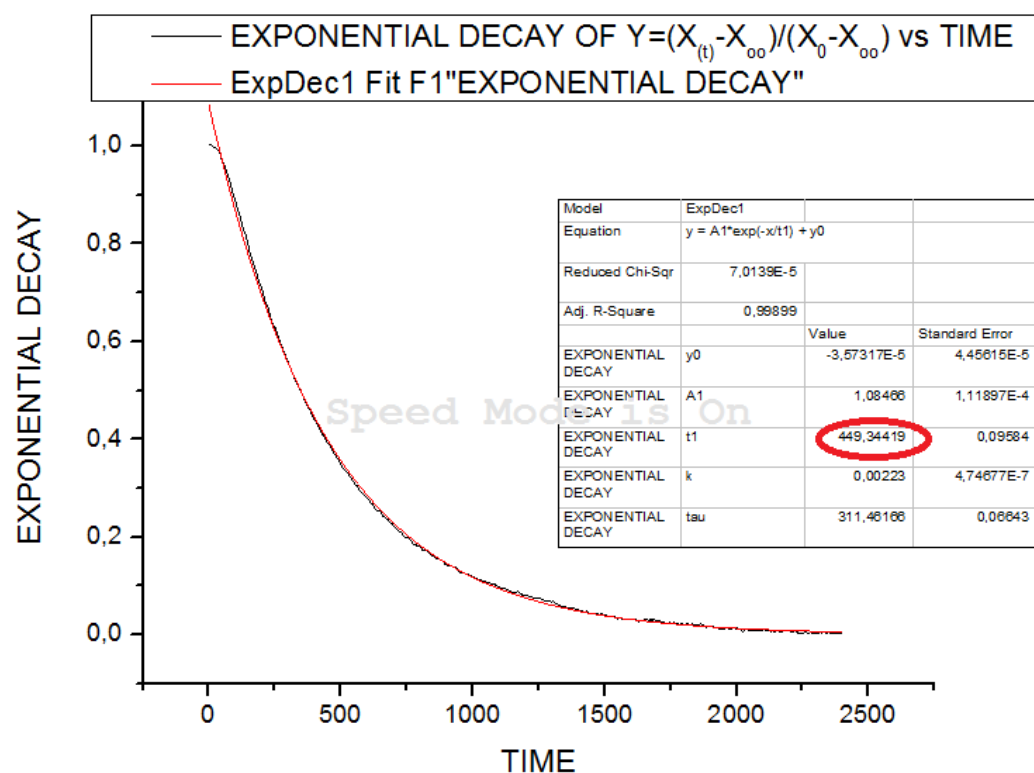
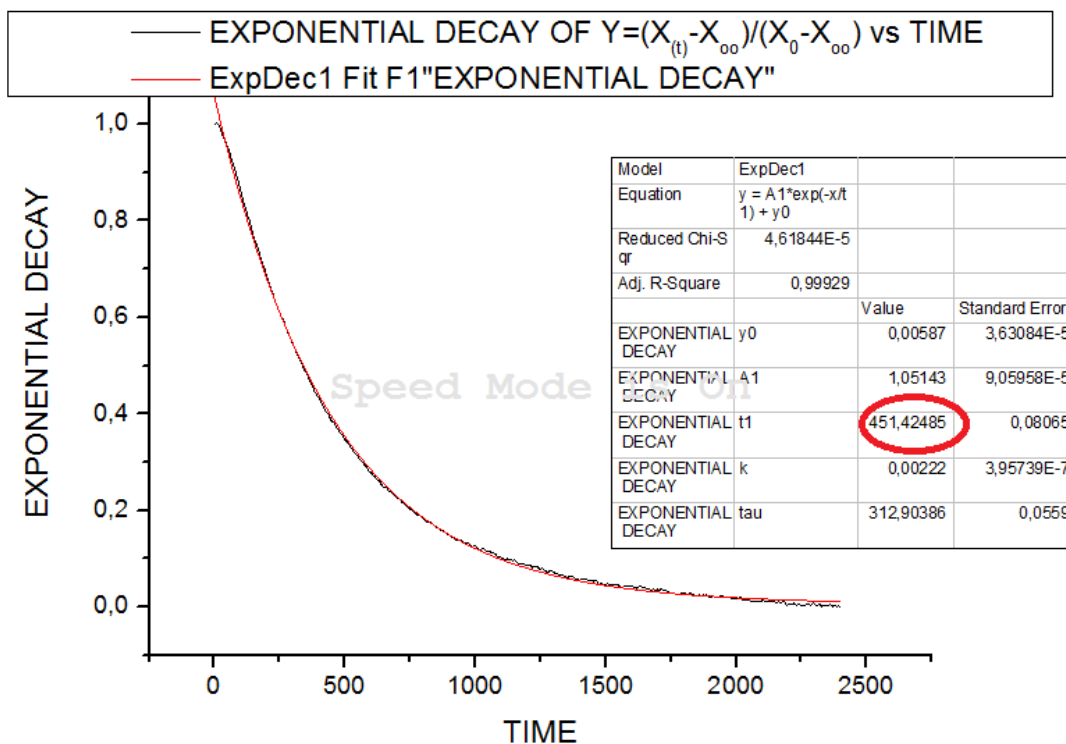
Εικόνα 5.9 Διαγράμματα Raw Data 24WH1,5COLDSTART, 24WH1,52M, 24WH1,510M, 24WH1,520M & 24WH1,530M



Από τη μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων γίνεται εμφανής η ομοιότητα της απόκρισης της θερμοκρασίας πυρήνα των πειραμάτων *COLDSTART* με την απόκριση βηματικής εισόδου συστήματος  $1^{η}$  τάξεως που παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο (Σχήμα 2.15). Επίσης, από την εξέταση των υπολοίπων διαγραμμάτων στα οποία εφαρμόζεται παλμικό σήμα ισχύος- εισόδου, παρατηρείται εναλλασσόμενη απόκριση της θερμοκρασίας, η οποία στα περισσότερα γραφήματα παρουσιάζει στην αρχή κι εκθετική μείωση. Αυτή η απόκριση μπορεί να, και θα, προσεγγιστεί με ημιτονοειδή απόκριση συστήματος  $1^{η}$  τάξεως, στο οποίο η είσοδος είναι ημιτονοειδούς μορφής (σχήμα 2.17). Από τη θεωρία, μια τέτοια απόκριση αρχικά παρουσιάζει εκθετική μείωση (μεταβατικός όρος) και στη συνέχεια επικρατεί ο σταθερός όρος και το σύστημα αποκρίνεται όμοια με το αντίστοιχο σήμα εισόδου αλλά με διαφορετικό πλάτος και φάση.

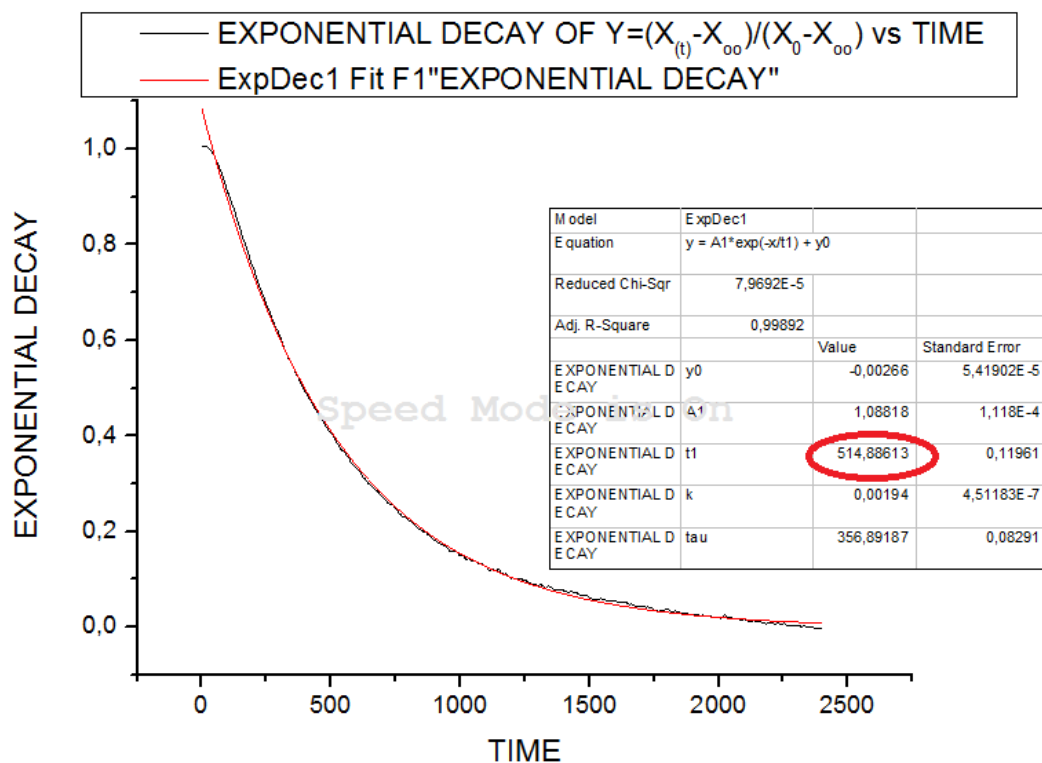
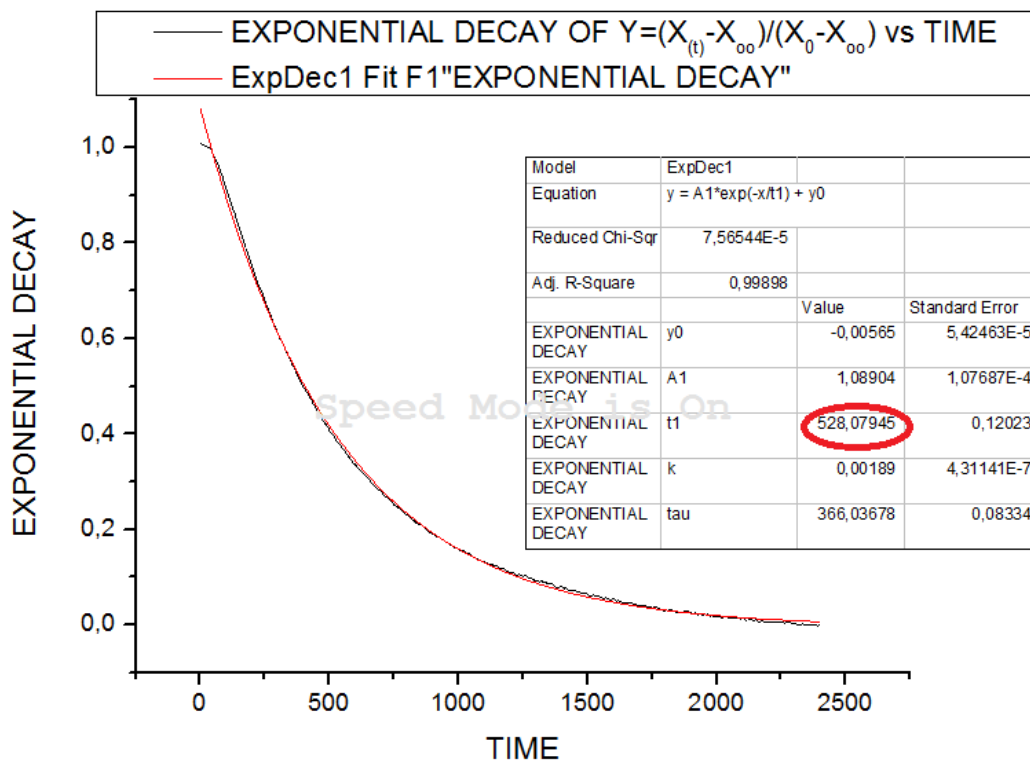
Η παραπάνω ομοιότητα των δύο σημάτων απόκρισης της θερμοκρασίας (δηλαδή στο διάγραμμα και στη θεωρία) οδήγησε στη υποψία ότι το υπό μελέτη σύστημα ακολουθεί τη συμπεριφορά συστήματος  $1^{η}$  τάξεως. Για να επαληθευθεί η παραπάνω υποψία, αρχικά έγινε υπολογισμός των χαρακτηριστικών (πλάτος- φάση) της πραγματικής απόκρισης θερμοκρασίας του συστήματος. Εν συνεχεία, έγινε ο θεωρητικός υπολογισμός της απόκρισης του συστήματος αλλά με είσοδο πλέον ένα θεωρητικό ημιτονοειδές σήμα διέγερσης με εύρος θερμοκρασιών  $y_{\omega}-y_0$  και συχνότητα ίση με το πραγματικό σήμα ισχύος- εισόδου για κάθε σενάριο. Τέλος, μέσα από τη σύγκριση των υπολογισμένων τιμών για κάθε σενάριο εξήχθησαν συμπεράσματα για το κατά πόσο τα χαρακτηριστικά της πραγματικής απόκρισης του υπό μελέτη συστήματος προσέγγιζαν αυτά της θεωρητικής απόκρισης ενός συστήματος  $1^{η}$  τάξεως. Η απόδειξη αυτής της αριθμητικής συσχέτισης θα αποτελούσε κι ικανοποιητική ένδειξη ότι το υπό εξέταση σύστημα θα μπορούσε να μεταχειριστεί ως σύστημα  $1^{η}$  τάξεως, το οποίο κι αποτελεί έναν από τους σκοπούς έρευνας αυτής της εργασίας.

Αρχικά, έγινε ανάλυση της βηματικής εισόδου στο σύστημα για τον υπολογισμό της χρονικής σταθεράς  $\tau$  με τη μεθοδολογία που αναφέρεται στο τέταρτο κεφάλαιο (Υποενότητα 4.3). Ακολουθώντας, παρατίθενται τα διαγράμματα εκθετικής μείωσης (διαγράμματα *Exponential Decay- Time*) (Εικόνες 5.10, 5.11 & 5.12) για τη κάθε απόκριση βηματικής εισόδου μέσω των οποίων βρέθηκε η ζητούμενη χρονική σταθερά  $\tau$  (στα διαγράμματα η χρονική σταθερά  $\tau$  συμβολίζεται με  $tI$ ). Στη συνέχεια, όλες οι υπολογισμένες χρονικές σταθερές του κάθε σεναρίου συγκεντρώνονται σε πίνακα (Πίνακας 5.2) για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.10 Διαγράμματα *Exponential Decay* για εύρεση της σταθεράς  $\tau$  στις περιπτώσεις V6COLDSTART1 & V6COLDSTART2

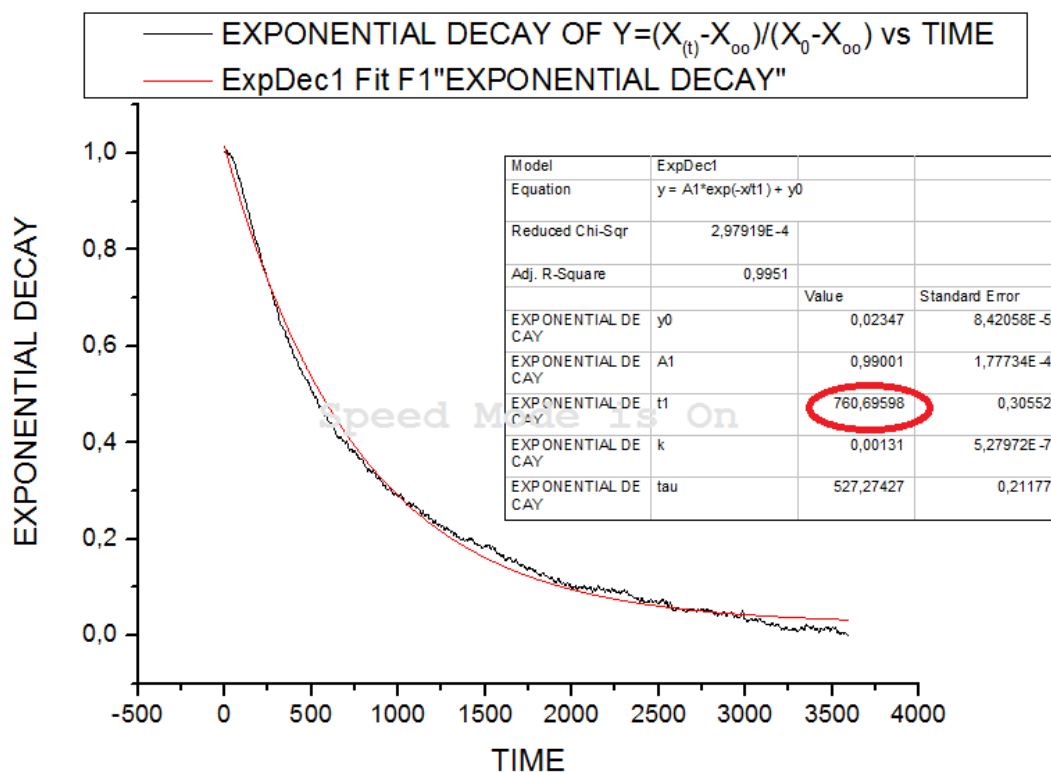




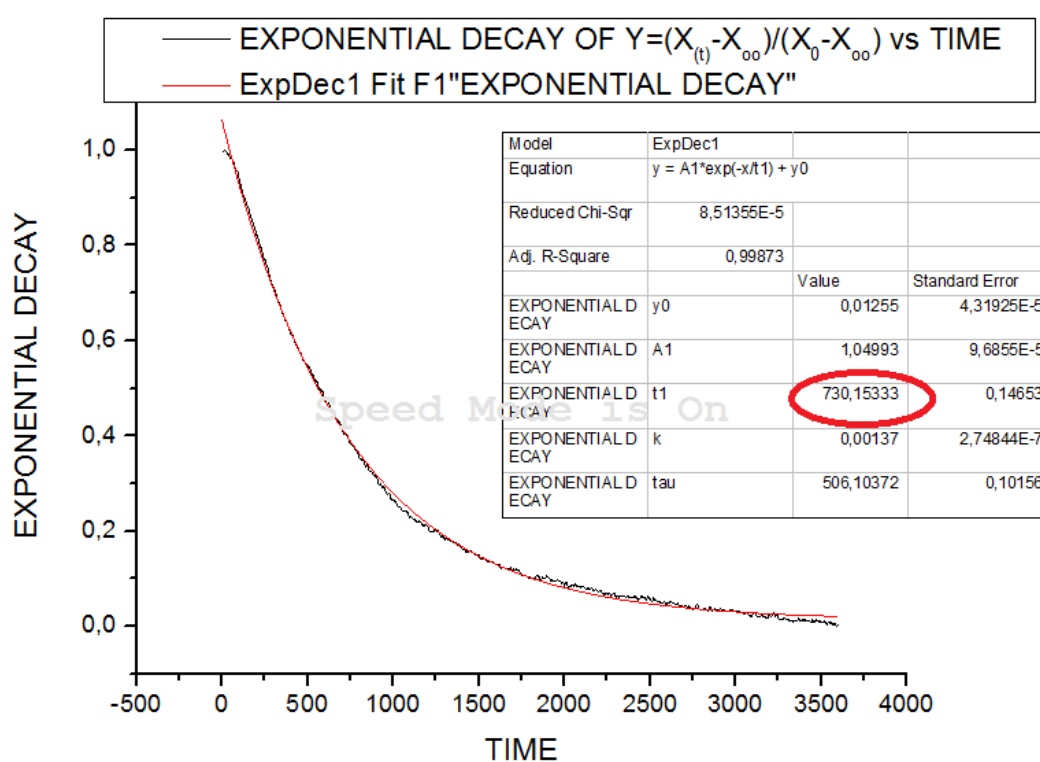
Εικόνα 5.11 Διαγράμματα *Exponential Decay* για εύρεση της σταθεράς  $\tau$  στις περιπτώσεις V1-5COLDSTART1 & V1-5COLDSTART2



1



1



Εικόνα 5.12 Διαγράμματα *Exponential Decay* για εύρεση της σταθεράς  $\tau$  στις περιπτώσεις 24WH6COLDSTART & 24WH1-5COLDSTART



ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ $\tau$ (sec)
V6COLDSTART1	451,425
V6COLDSTART2	449,344
V1-5COLDSTART1	528,079
V1-5COLDSTART2	514,886
24WH6COLDSTART	760,696
24WH1-5COLDSTART	730,153

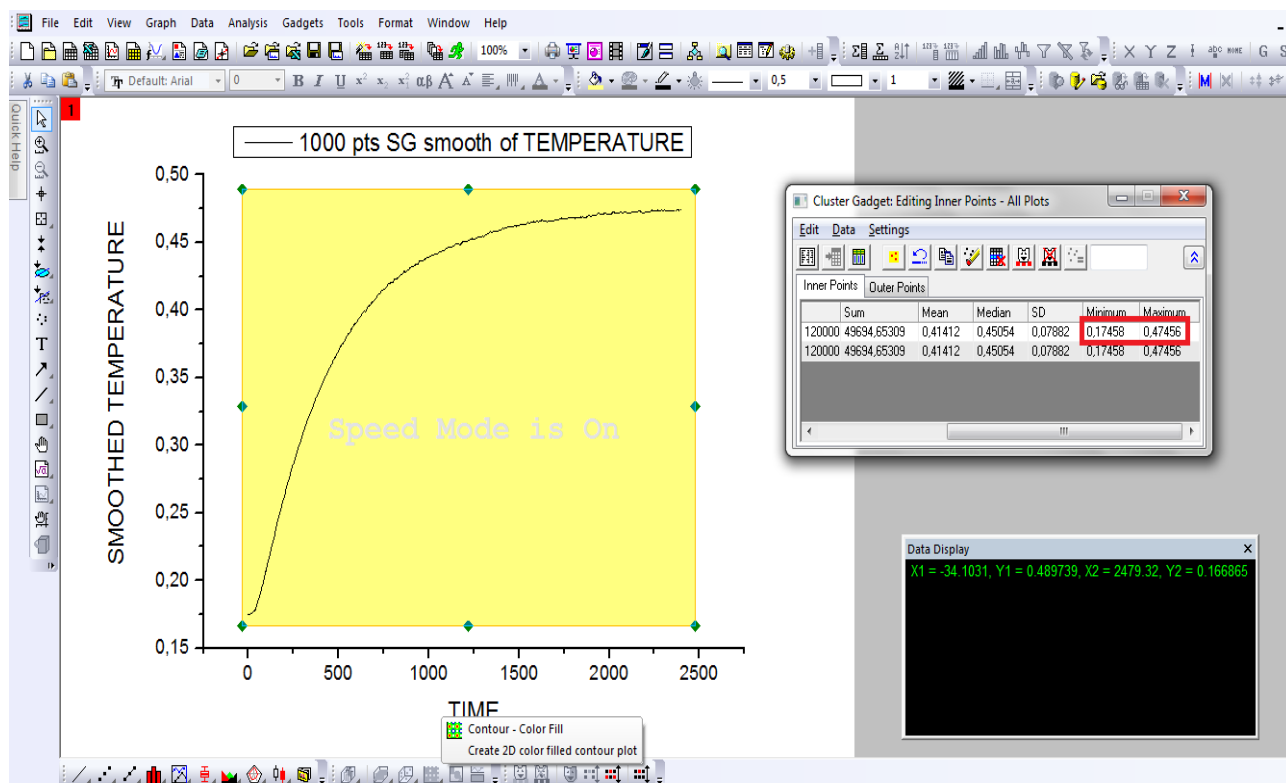
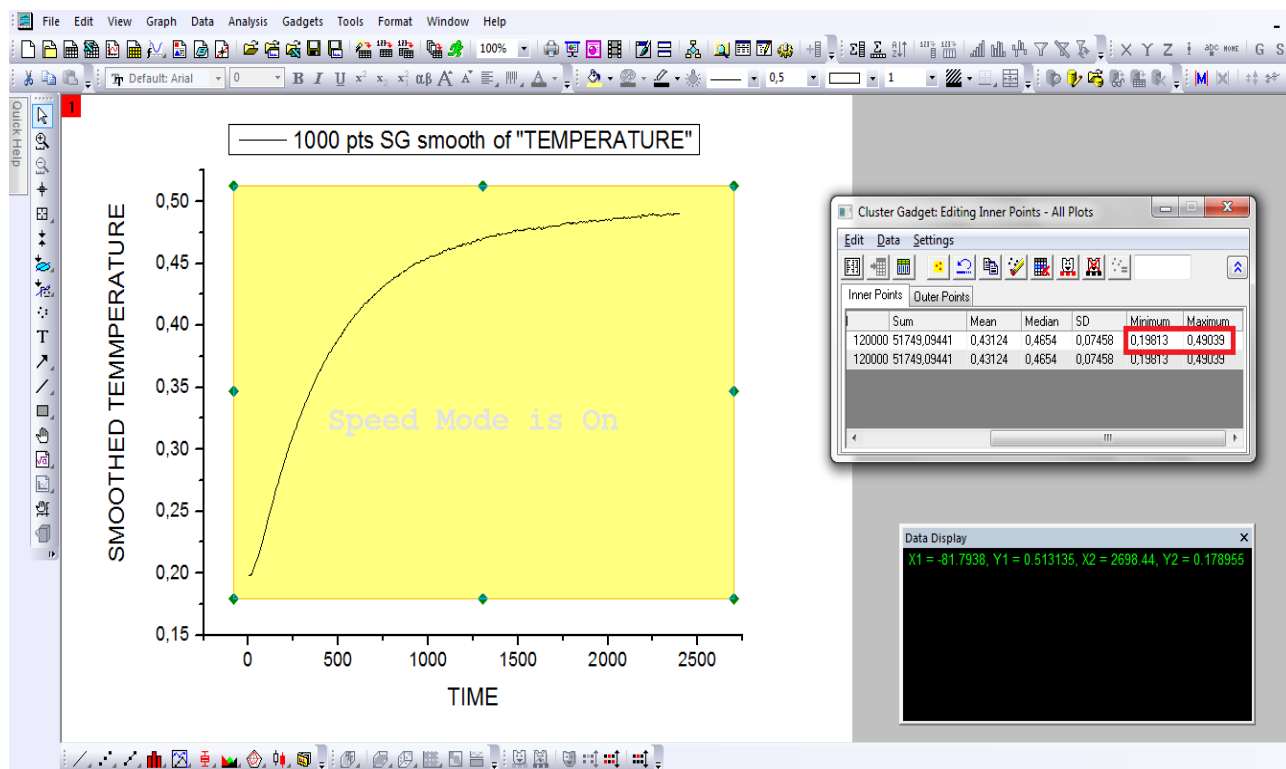
Πίνακας 5.2 Οι τιμές της χρονικής σταθεράς  $\tau$  για τις διάφορες περιπτώσεις *COLDSTART*

Από την συγκεντρωτική κατανομή των χρονικών σταθερών  $\tau$  παρατηρείται εξάρτηση αυτών από τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται τα πειράματα του εκάστοτε σεναρίου *COLDSTART* (ισχύς εισόδου *soldering iron* & τάση λειτουργίας ανεμιστήρα). Συγκεκριμένα, διαφαίνεται μία αύξηση των τιμών της σταθεράς με τη μείωση της ισχύος εισόδου, καθώς και τη μείωση της τάσης τροφοδοσίας του *fan*. Μάλιστα, η αύξηση αυτή είναι εντονότερη στη πρώτη περίπτωση. Ειδικότερα, αποδίδεται στο γεγονός ότι, όταν η εισροή θερμότητας προς τον πυρήνα της διάταξης μέσω του *soldering iron* αλλά κι η εκροή αυτής μέσω του *heat pipe* (και κατ' επέκταση του ανεμιστήρα) είναι εντονότερες, τότε απαιτείται λιγότερος χρόνος ούτως ώστε το σύστημα να μεταβεί σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας.

Μία ακόμη παράμετρος που μελετήθηκε για τα πειράματα *COLDSTART* ήταν η εξάρτηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του πυρήνα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η εξέταση του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3) αναδεικνύει την αναλογική σχέση που συνδέει τις δύο παραπάνω θερμοκρασίες.

Πείραμα	Αρχική θερμοκρασία πυρήνα (°C)	Θερμοκρασία ισορροπίας πυρήνα (°C)	Διαφορά θερμοκρασιών πυρήνα (°C)	Θερμοκρασία δωματίου (°C)
V6COLDSTART1	19,81	49,04	29,23	19,72
V6COLDSTART2	17,46	47,46	30,0	18,34
V1-5COLDSTART1	18,85	54,48	35,63	19,56
V1-5COLDSTART2	16,97	50,46	33,49	17,58

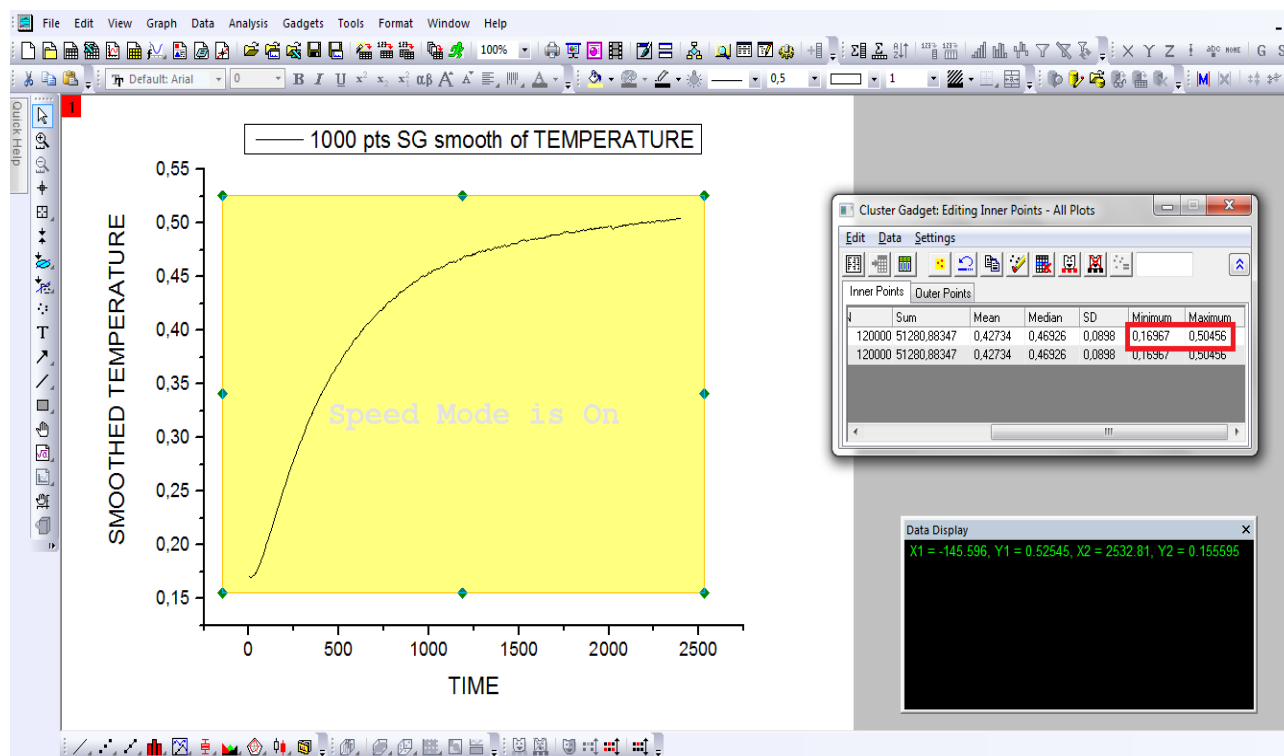
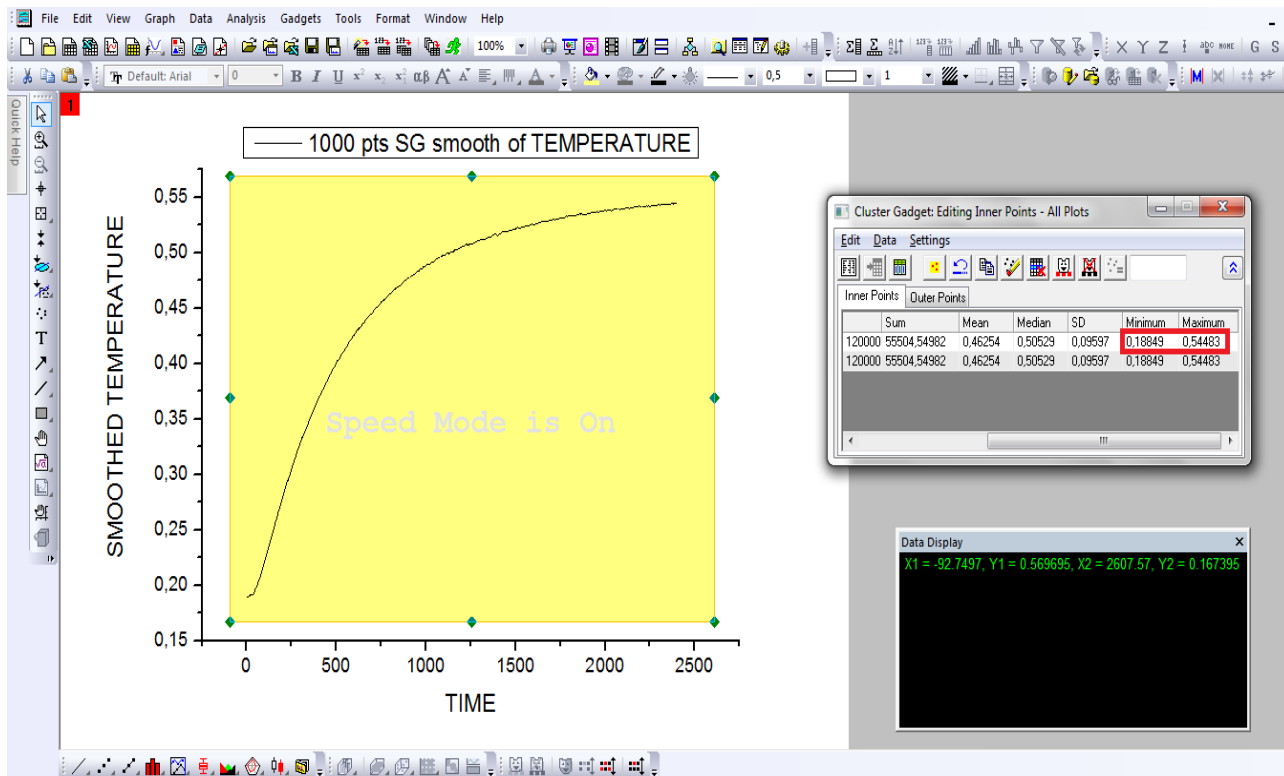
Πίνακας 5.3 Τιμές θερμοκρασίας του πυρήνα και του περιβάλλοντος για τα πειράματα *COLDSTART*



Εικόνα 5.13 Διαγράμματα θερμοκρασίας πυρήνα για τις περιπτώσεις V6COLDSTART1 & V6COLDSTART



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



Εικόνα 5.14 Διαγράμματα θερμοκρασίας πυρήνα για τις περιπτώσεις V1-5COLDSTART1 & V1-5COLDSTART2





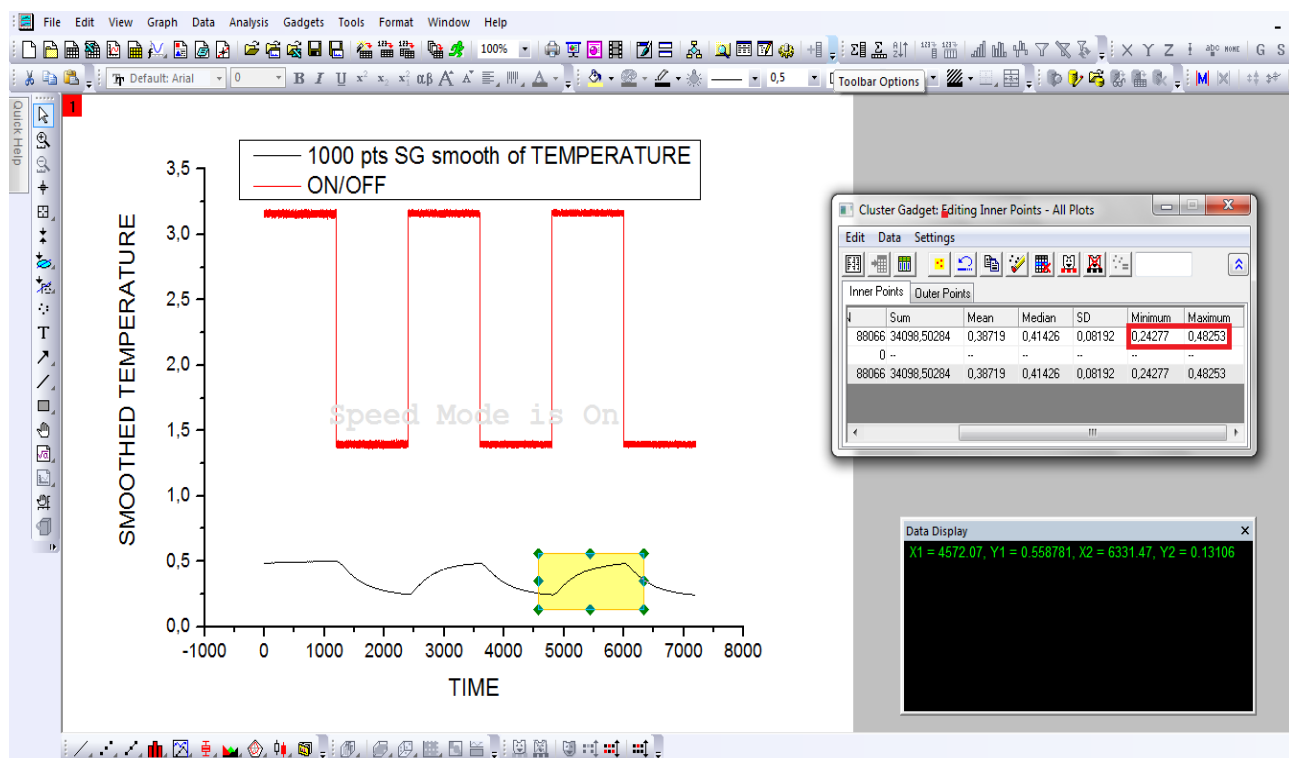
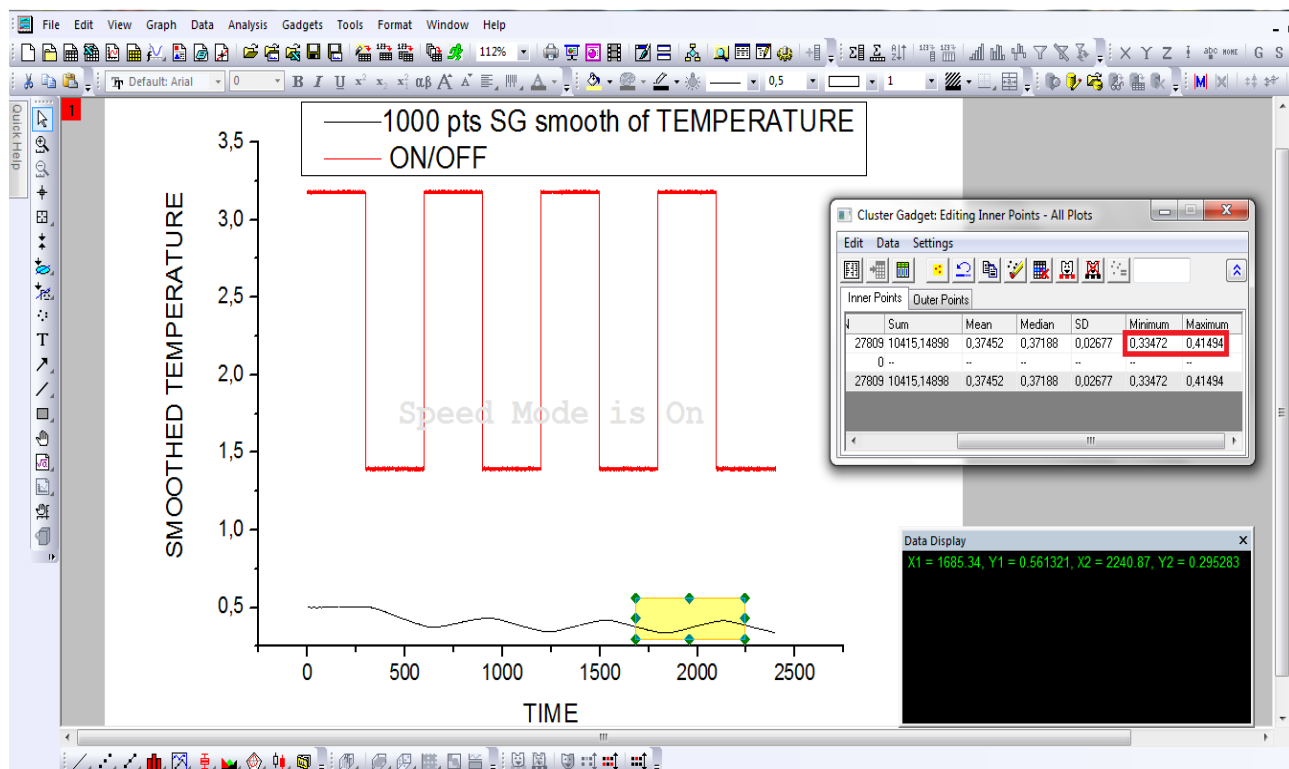
Από τα παραπάνω διαγράμματα (Εικόνες 5.13 & 5.14) υπολογίσθηκαν οι τιμές θερμοκρασίας του πυρήνα που χρησιμοποιήθηκαν στη συμπλήρωση των τριών πρώτων στηλών του πίνακα 5.2. Αυτές προέκυψαν με τη χρήση της επιλογής **Cluster** για την εύρεση των ακρότατων της κάθε καμπύλης αφού όμως πρώτα έγινε **smoothing** των τιμών σε καθεμία απ' αυτές για πιο ακριβή υπολογισμό. Η τελευταία στήλη συμπληρώθηκε μέσω της καταγραφής της μέσης τιμής των θερμοκρασιών δωματίου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με τη χρήση του χρονομέτρου-θερμομέτρου *Auriol*.

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.2, επιβεβαιώνεται η αναλογική σχέση των θερμοκρασιών που αναφέρθηκε προηγουμένως, καθώς σχεδόν σ' όλες τις περιπτώσεις η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά  $x$  βαθμούς προκαλεί σχεδόν την ίδια αύξηση στη τελικής θερμοκρασία του πυρήνα.

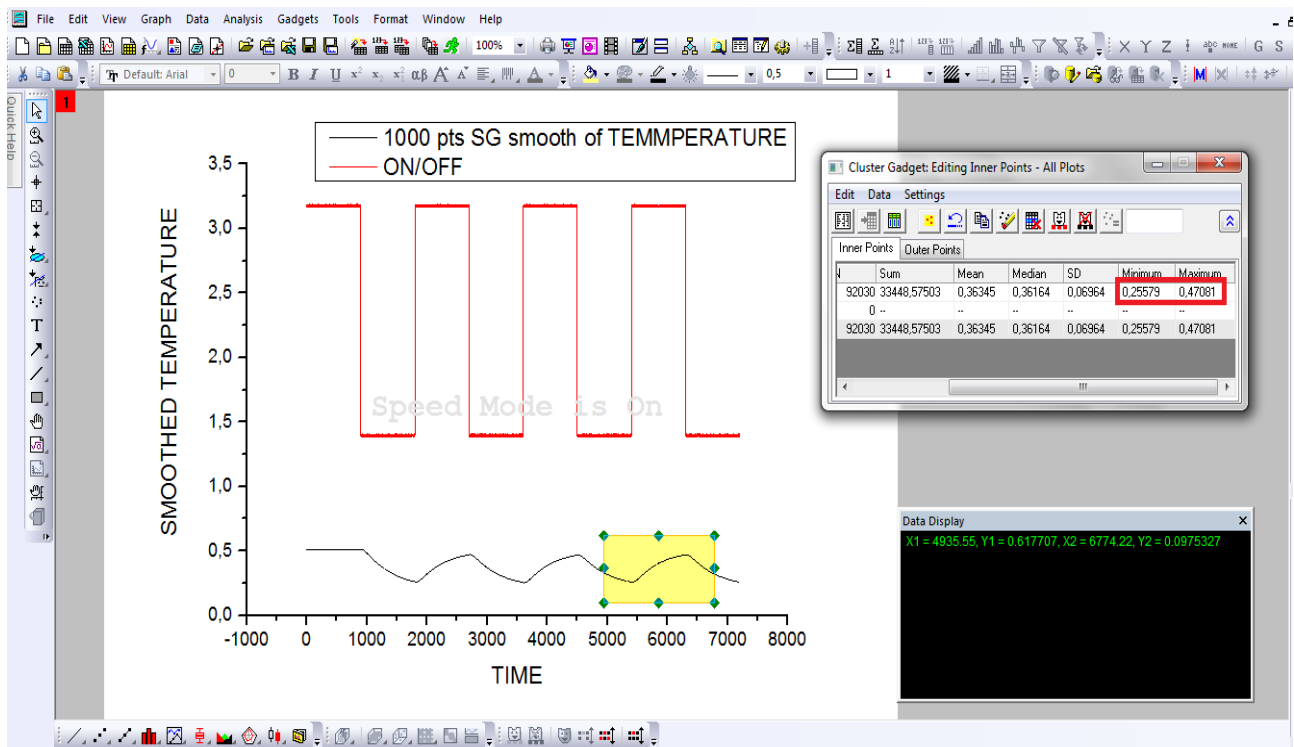
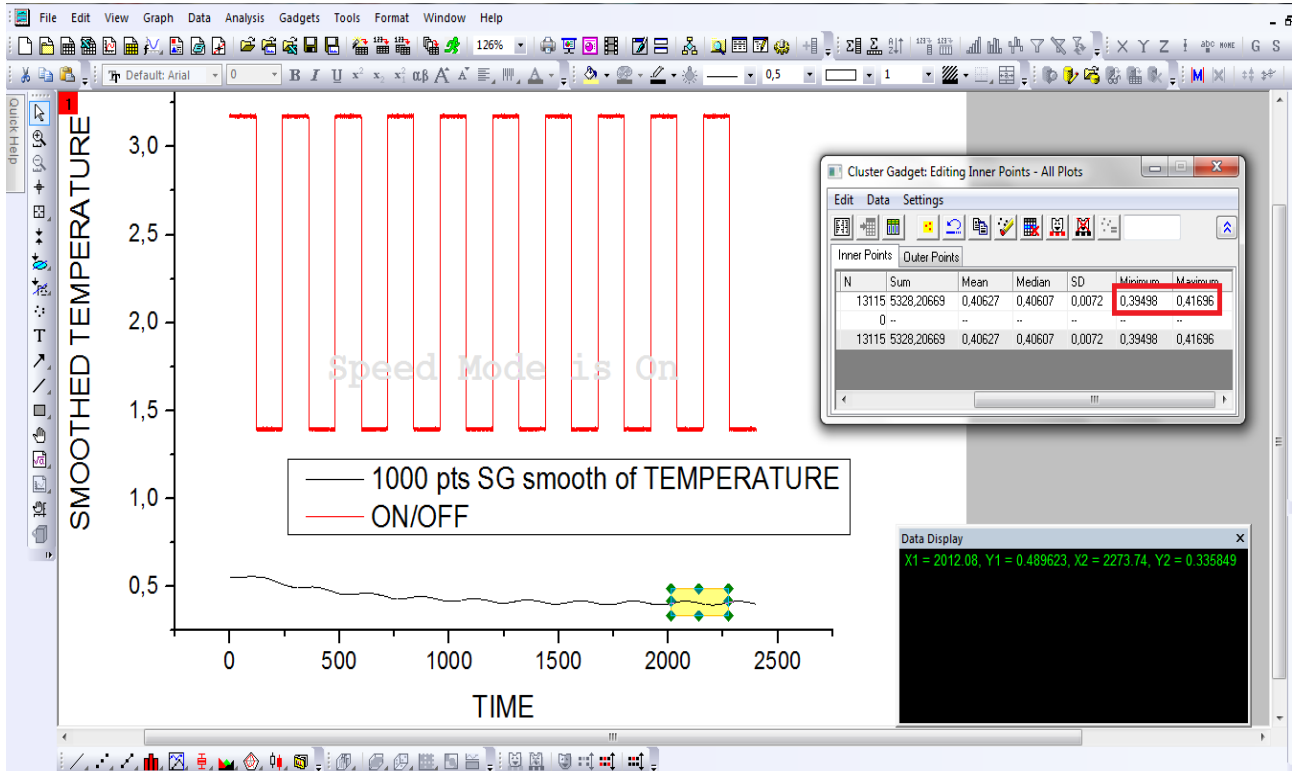
Για τη μελέτη του πλάτους απόκρισης της θερμοκρασίας κατά τη μεταβαλλόμενη φόρτιση του πυρήνα, τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν με δύο τρόπους.

Αρχικά, υπολογίστηκε ο συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.33 της θεωρίας και στη συνέχεια έγινε γραφικός υπολογισμός μέσω της χρήσης των διαγραμμάτων των πειραμάτων για κάθε περίπτωση.

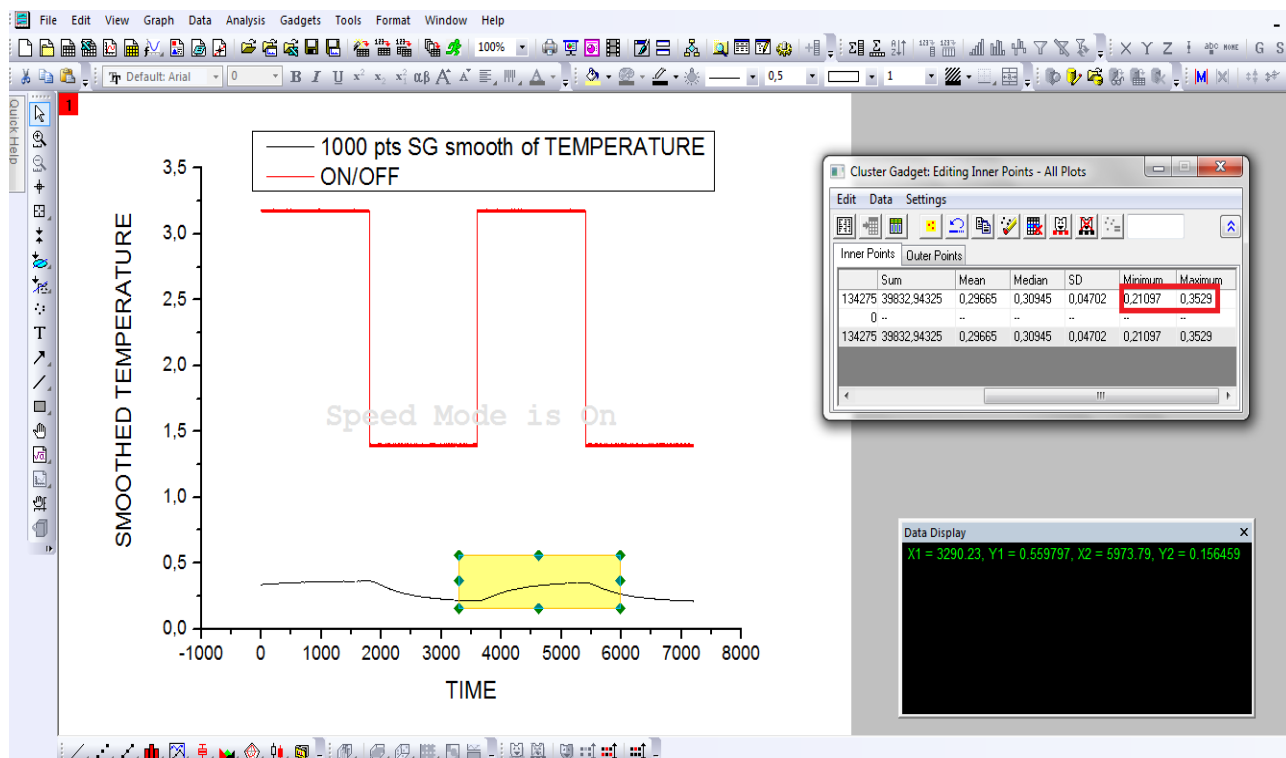
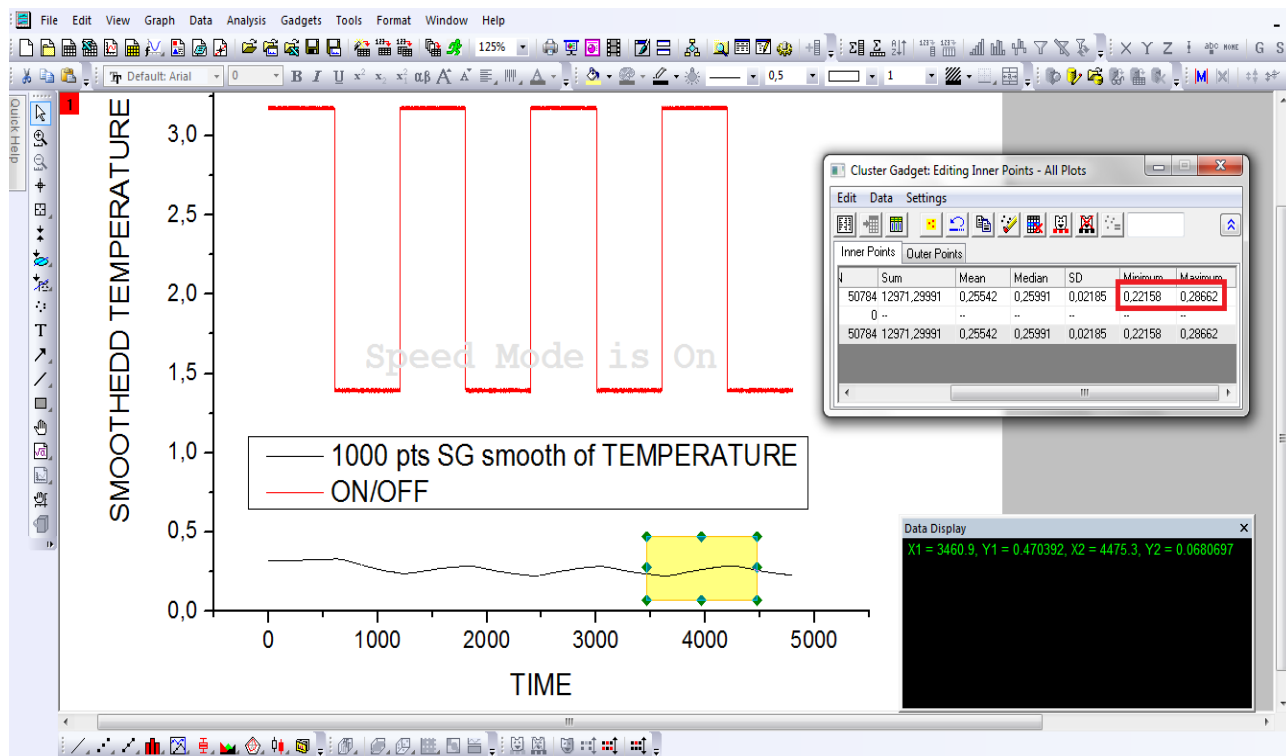
Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα παραδείγματα υπολογισμού της πειραματικής μείωσης του πλάτους απόκρισης μέσα από τα ακόλουθα γραφήματα (Εικόνες 5.15, 5.16 & 5.17). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε δύο φορές για κάθε σενάριο ούτως ώστε να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του εύρους ταλάντωσης της θερμοκρασίας κατά τη σταθερή κατάσταση του συστήματος. Οι τιμές του εύρους που καταγραφθήκαν, διαιρέθηκαν με το μέγιστο δυνατό εύρος ταλάντωσης  $y_{\infty}-y_0$ , το οποίο είχε ήδη υπολογιστεί μέσω των πειραμάτων *COLDSTART*, για την εύρεση του πειραματικού συντελεστή μείωσης του πλάτους του σήματος απόκρισης.



Εικόνα 5.15 Υπολογισμός των ακρότατων τιμών θερμοκρασίας με τη βοήθεια του **Cluster** για τις περιπτώσεις V65M & V620M



Εικόνα 5.16 Υπολογισμός των ακρότατων τιμών θερμοκρασίας με τη βοήθεια του **Cluster** για τις περιπτώσεις V1-52M & V1-515M



Εικόνα 5.17 Υπολογισμός των ακρότατων τιμών θερμοκρασίας με τη βοήθεια του **Cluster** για τις περιπτώσεις 24WH610M & 24WH1-530M

Όλες οι τιμές και τα δεδομένα που προέκυψαν από τα παραπάνω βήματα συγκεντρώνονται στους πίνακες (Πίνακας 5.4, 5.5, 5.6 & 5.7) που ακολουθούν.

Θεωρητικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $[1+(\omega*\tau)^2]^{-1/2}$	Πειραματικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $\frac{B}{A} = \frac{\text{Διαφορά ακρότατων τιμών}}{y_{\infty}-y_0}$	Γωνιακή συχνότητα του σήματος $\omega = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right)$	Πείραμα	$\omega*\tau \text{ (rad)}$
0,0424	0,0186	0,05233	V61M	23,5687
0,0845	0,0744	0,02617	V62M	11,7866
0,2075	0,2642	0,01047	V65M	4,7155
0,3908	0,5342	0,00523	V610M	2,3555
0,5368	0,7050	0,00349	V615M	1,5718
0,6465	0,8109	0,00262	V620M	1,1800
0,7282	0,8627	0,00209	V625M	0,9413
0,7871	0,9056	0,00174	V630M	0,7837

Πίνακας 5.4 Οι συντελεστές μείωσης του πλάτους απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 48 Watt, κάθετου *heat pipe* & τάσης *fan* 6 Volts

Θεωρητικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $[1+(\omega*\tau)^2]^{-1/2}$	Πειραματικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $\frac{B}{A} = \frac{\text{Διαφορά ακρότατων τιμών}}{y_{\infty}-y_0}$	Γωνιακή συχνότητα του σήματος $\omega = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right)$	Πείραμα	$\omega*\tau \text{ (rad)}$
0,0366	0,0278	0,05233	V1-51M	27,2909
0,0731	0,0635	0,02617	V1-52M	13,6454
0,1802	0,2204	0,01047	V1-55M	5,4582
0,3442	0,5089	0,00523	V1-510M	2,7274
0,4816	0,6331	0,00349	V1-515M	1,8200
0,5906	0,7526	0,00262	V1-520M	1,3663
0,6761	0,8439	0,00209	V1-525M	1,0899
0,7406	0,8937	0,00174	V1-530M	0,9074

Πίνακας 5.5 Οι συντελεστές μείωσης του πλάτους απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 48 Watt, κάθετου *heat pipe* & τάσης *fan* 1,5 Volts



Θεωρητικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $[1+(\omega*\tau)^2]^{-1/2}$	Πειραματικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $\frac{B}{A} = \frac{\text{Διαφορά ακρότατων τιμών}}{y_{\infty}-y_0}$	Γωνιακή συχνότητα του σήματος $\omega = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right)$	Πείραμα	$\omega*\tau \text{ (rad)}$
0,0502	0,0543	0,02617	24WH62M	19,9074
0,2438	0,4536	0,00523	24WH610M	3,9784
0,4485	0,8377	0,00262	24WH620M	1,9930
0,6028	1,0014	0,00174	24WH630M	1,3236

Πίνακας 5.6 Οι συντελεστές μείωσης του πλάτους απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 24 Watt, οριζόντιου *heat pipe* & τάσης *fan* 6 Volts

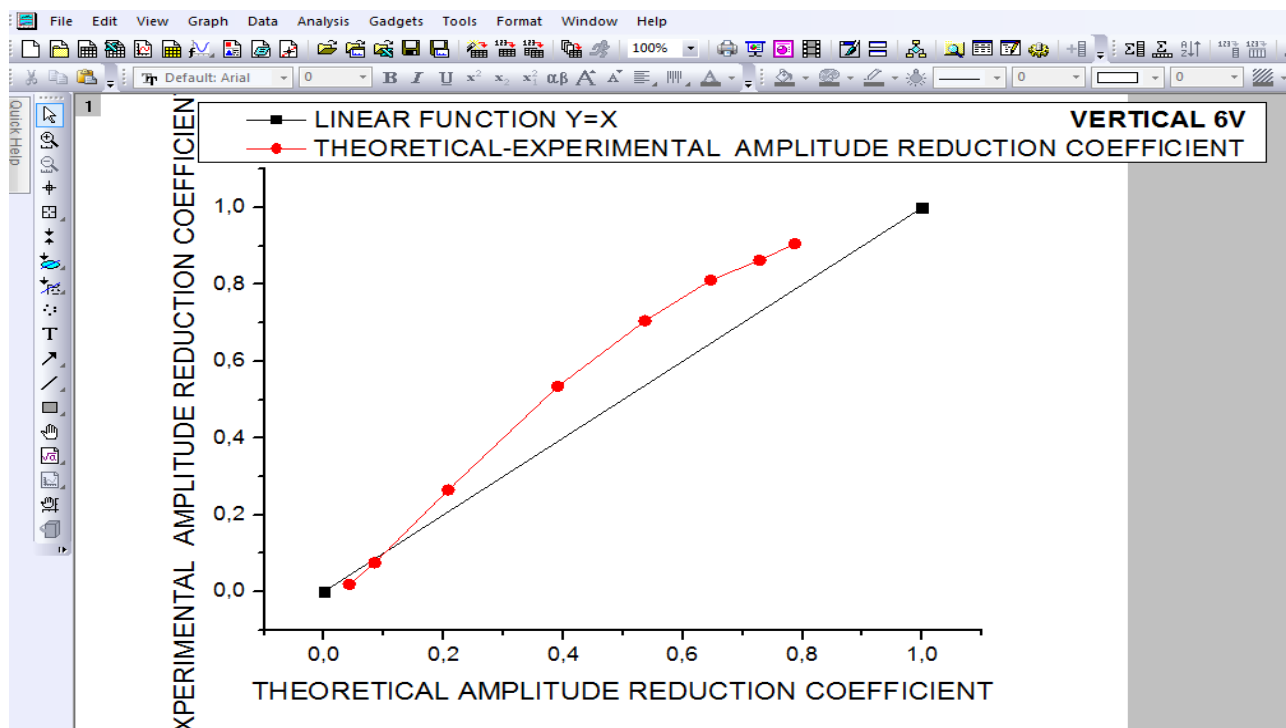
Θεωρητικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $[1+(\omega*\tau)^2]^{-1/2}$	Πειραματικός συντελεστής μείωσης του πλάτους απόκρισης του σήματος $\frac{B}{A} = \frac{\text{Διαφορά ακρότατων τιμών}}{y_{\infty}-y_0}$	Γωνιακή συχνότητα του σήματος $\omega = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right)$	Πείραμα	$\omega*\tau \text{ (rad)}$
0,0523	0,0426	0,02617	24WH1-52M	19,1081
0,2533	0,4172	0,00523	24WH1-510M	3,8187
0,4633	0,7141	0,00262	24WH1-520M	1,9130
0,6185	0,8279	0,00174	24WH1-530M	1,2705

Πίνακας 5.7 Οι συντελεστές μείωσης του πλάτους απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 24 Watt, οριζόντιου *heat pipe* & τάσης *fan* 1,5 Volts

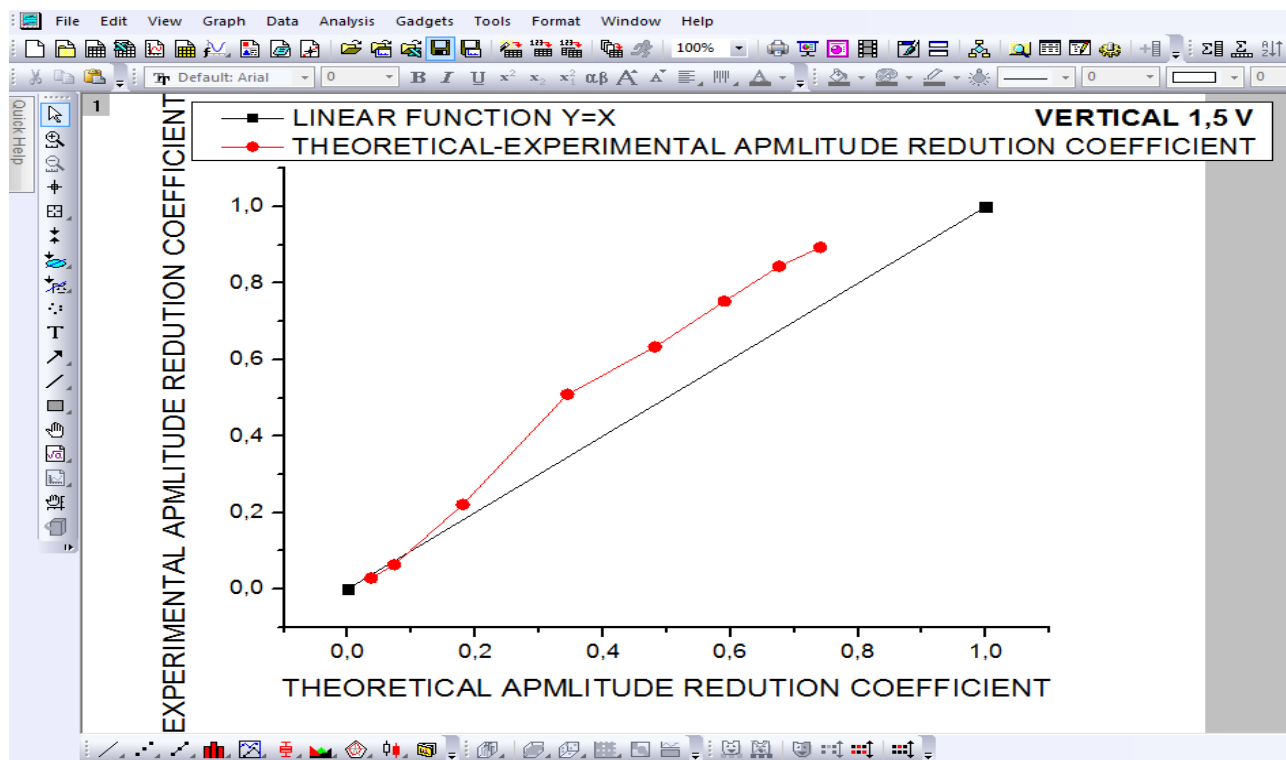
Στους παραπάνω πίνακες, η γωνιακή συχνότητα  $\omega$  αφορά τη συχνότητα του εκάστοτε σήματος εισόδου, ενώ το  $\tau$  έχει να κάνει με τη χρονική σταθερά του συστήματος η οποία υπολογίστηκε στις περιπτώσεις των *COLDSTART*. Για καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση της διαφοράς μεταξύ του θεωρητικού και πειραματικά υπολογισμένου συντελεστή μείωσης, τα δεδομένα των δύο πρώτων στηλών των προηγούμενων πινάκων τοποθετήθηκαν ως σημεία σε κοινό σύστημα αξόνων. Τα τελικά διαγράμματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 5.18, 5.19, 5.20 & 5.21).



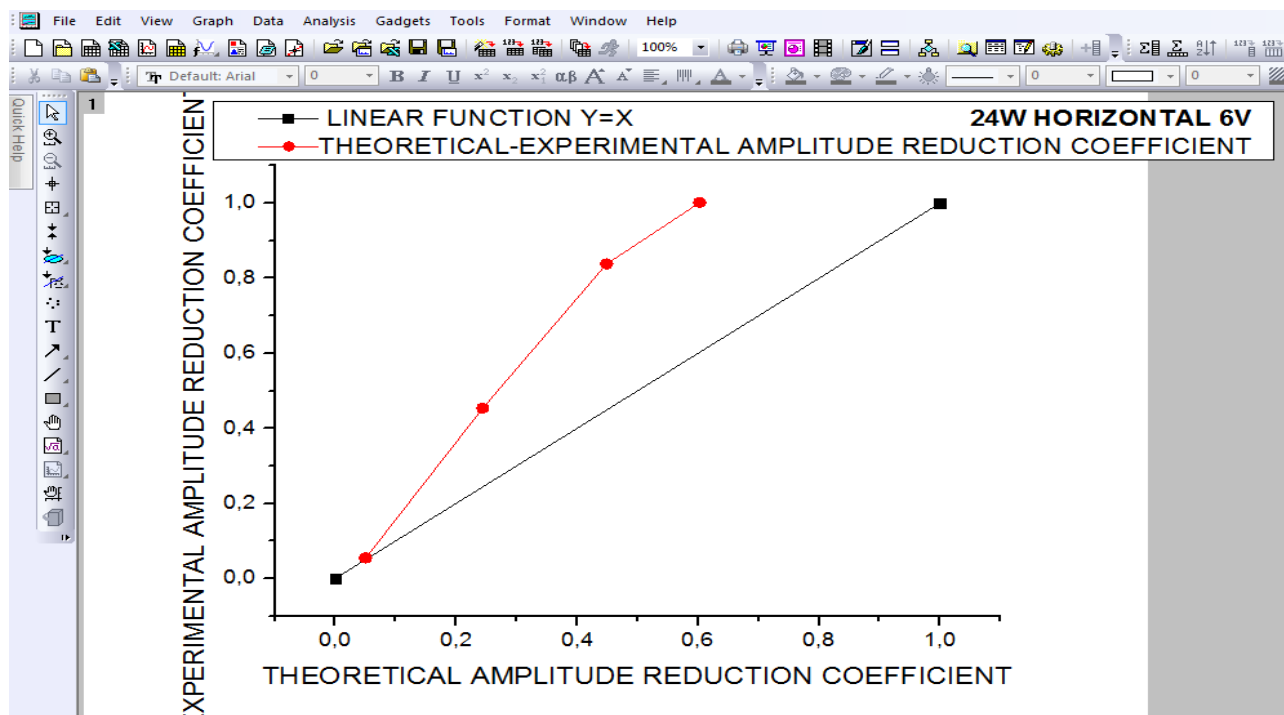
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



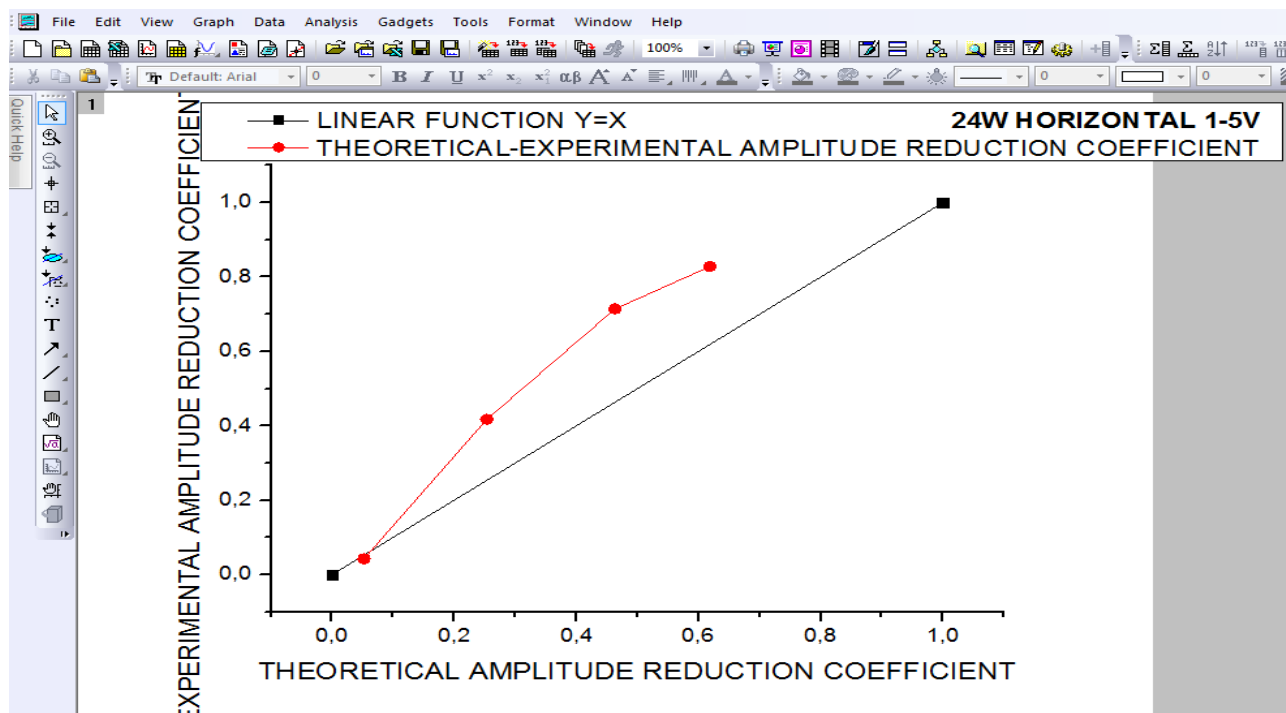
Εικόνα 5.18 Σύγκριση θεωρητικών & πειραματικών μετρήσεων του πλάτους απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (V6)



Εικόνα 5.19 Σύγκριση θεωρητικών & πειραματικών μετρήσεων του πλάτους απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (V1,5)



Εικόνα 5.20 Σύγκριση θεωρητικών & πειραματικών μετρήσεων του πλάτους απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (24WH6)



Εικόνα 5.21 Σύγκριση θεωρητικών & πειραματικών μετρήσεων του πλάτους απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (24WH1,5)



Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα τρεις είναι οι άμεσες παρατηρήσεις που μπορούν να εξαχθούν. Η πρώτη και κυριότερη είναι η ύπαρξη σύγκλισης μεταξύ των πειραματικά υπολογισμένων τιμών του συντελεστή μείωσης πλάτους απόκρισης και των αντίστοιχων θεωρητικών τιμών αυτού. Ουσιαστικά, παρατηρείται μία μείωση του πλάτους του αποκρινόμενου σήματος καθώς η συχνότητα εισόδου αυξάνεται και για τις δύο περιπτώσεις (θεωρητική και πειραματική), η οποία μάλιστα είναι αρκετά όμοια σε τάξη μεγέθους και κλίση μείωσης, όπως φαίνεται και στα προηγούμενα διαγράμματα. Αυτή η ομοιότητα αποτελεί στοιχείο μέσω του οποίου μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά, όσον αφορά το πλάτος του αποκρινόμενου σήματος του υπό μελέτη συστήματος, προσεγγίζει αυτήν ενός συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως. Η απόκλιση αυτών δε, είναι αναμενόμενη σε κάποιο βαθμό διότι στους θεωρητικούς υπολογισμούς υποτέθηκε σήμα διέγερσης ημιτονοειδούς μορφής, γεγονός το οποίο προσομοιάζει αλλά δεν αντιγράφει πιστά τη πραγματική διέγερση του συστήματος.

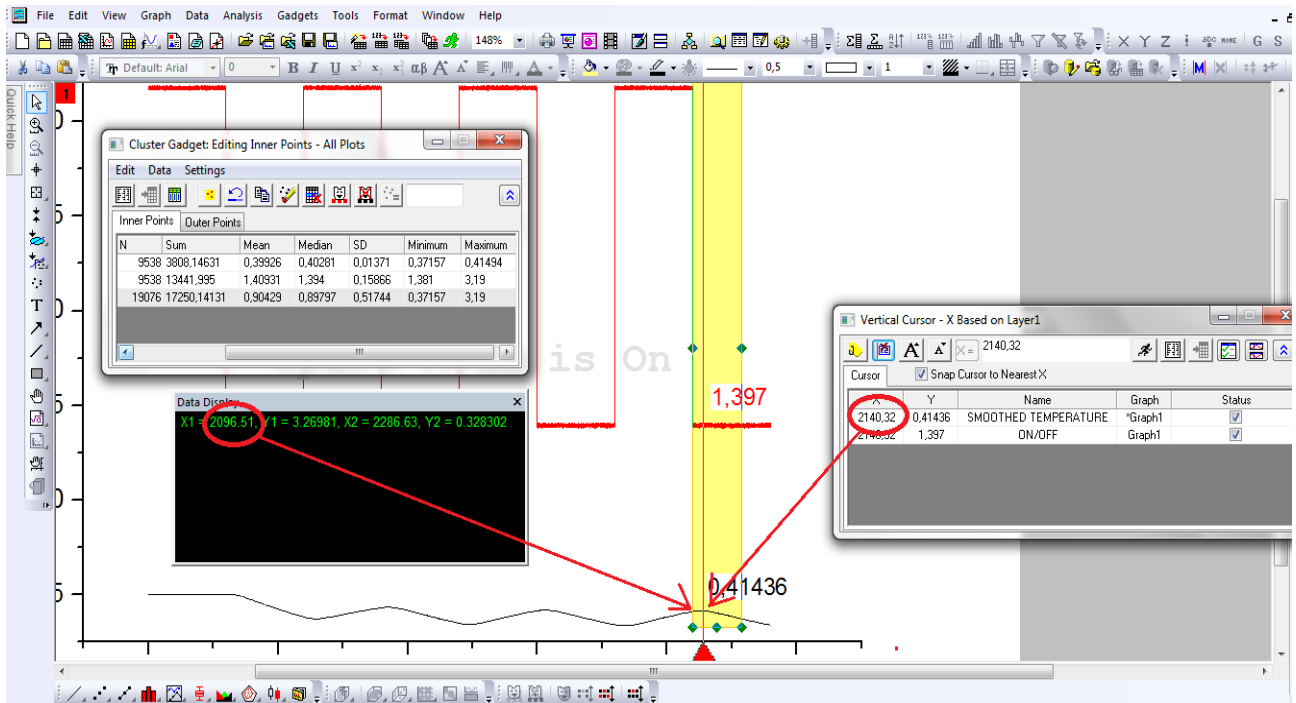
Μια δεύτερη επισήμανση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι η προαναφερθείσα προσέγγιση είναι αρκετά πιστή στη θεωρία για τις περιπτώσεις των υψηλών συχνοτήτων εισόδου. Ειδικότερα, σε αυτές παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών συντελεστών μείωσης του πλάτους.

Τέλος, ένα τρίτο σχόλιο αφορά τη περίπτωση μικρότερου πλάτους σήματος ισχύος- εισόδου (24 Watt) όπου η απόκλιση των τιμών του συντελεστή είναι μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό αποδίδεται, όπως και στη περίπτωση του υπολογισμού της χρονικής σταθεράς  $\tau$ , στην ύπαρξη λιγότερο έντονων φαινομένων που καθυστερούν περισσότερο τη θερμοκρασιακή μετατόπιση του συστήματος άρα και τις οποιεσδήποτε μεταβολές αυτού, δημιουργώντας μεγαλύτερη αδράνεια.

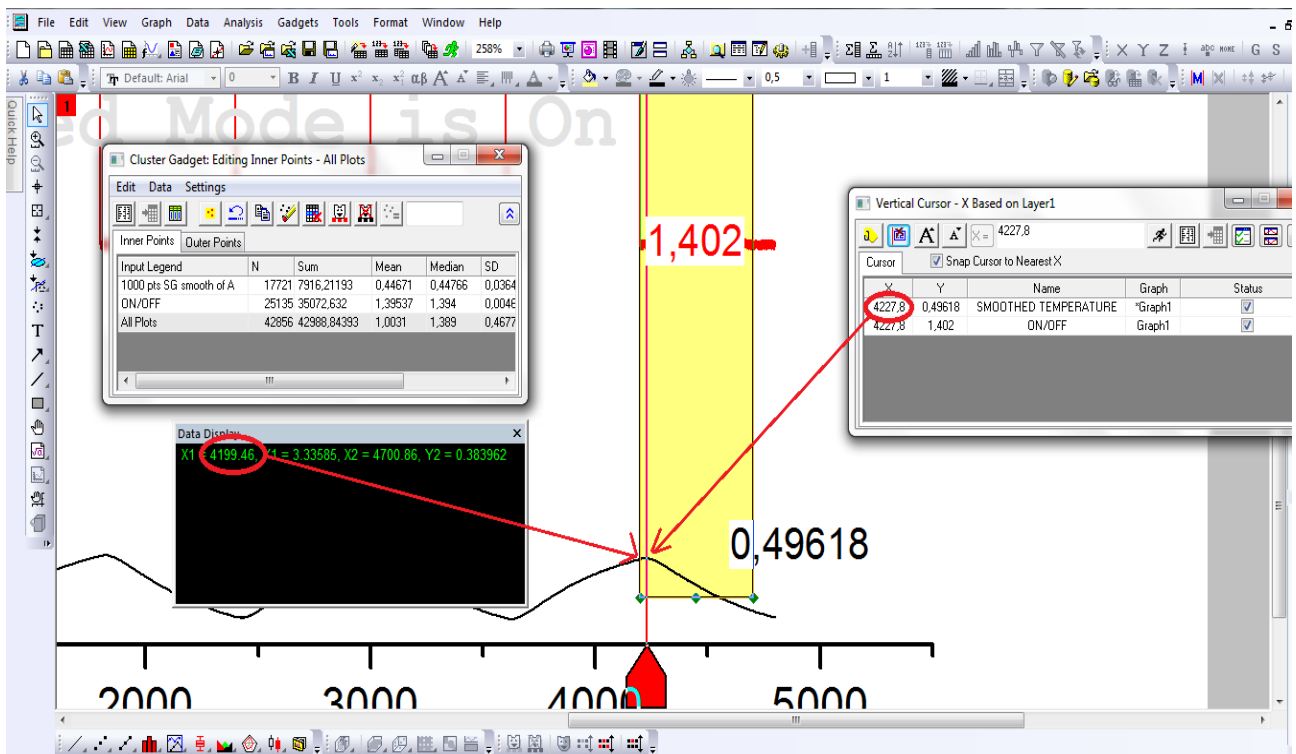
Για τη μελέτη της φάσης απόκρισης της θερμοκρασίας κατά τη μεταβαλλόμενη φόρτιση του πυρήνα, τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν με τρεις τρόπους.

Αρχικά, υπολογίστηκε με τη βοήθεια της σχέσης 2.34 η θεωρητική τιμή της φάσης απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος και στη συνέχεια έγινε γραφική επίλυση του προβλήματος με τη χρήση της πειραματικής μεθοδολογίας του προηγούμενου κεφαλαίου (Σχήμα 4.9). Επιπλέον, από το ίδιο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε κι ο μετασχηματισμός *Fourier* για περεταίρω σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων.

Μερικά παραδείγματα γραφικού υπολογισμού της φάσης ακολουθούν στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνες 5.22, 5.23, 5.24 & 5.25), όπου διακρίνονται με κόκκινα βέλη τα σημεία εκείνα στα οποία παρουσιάζουν ακρότατα τόσο το σήμα ισχύος- εισόδου όσο και το σήμα θερμοκρασίας- εξόδου.

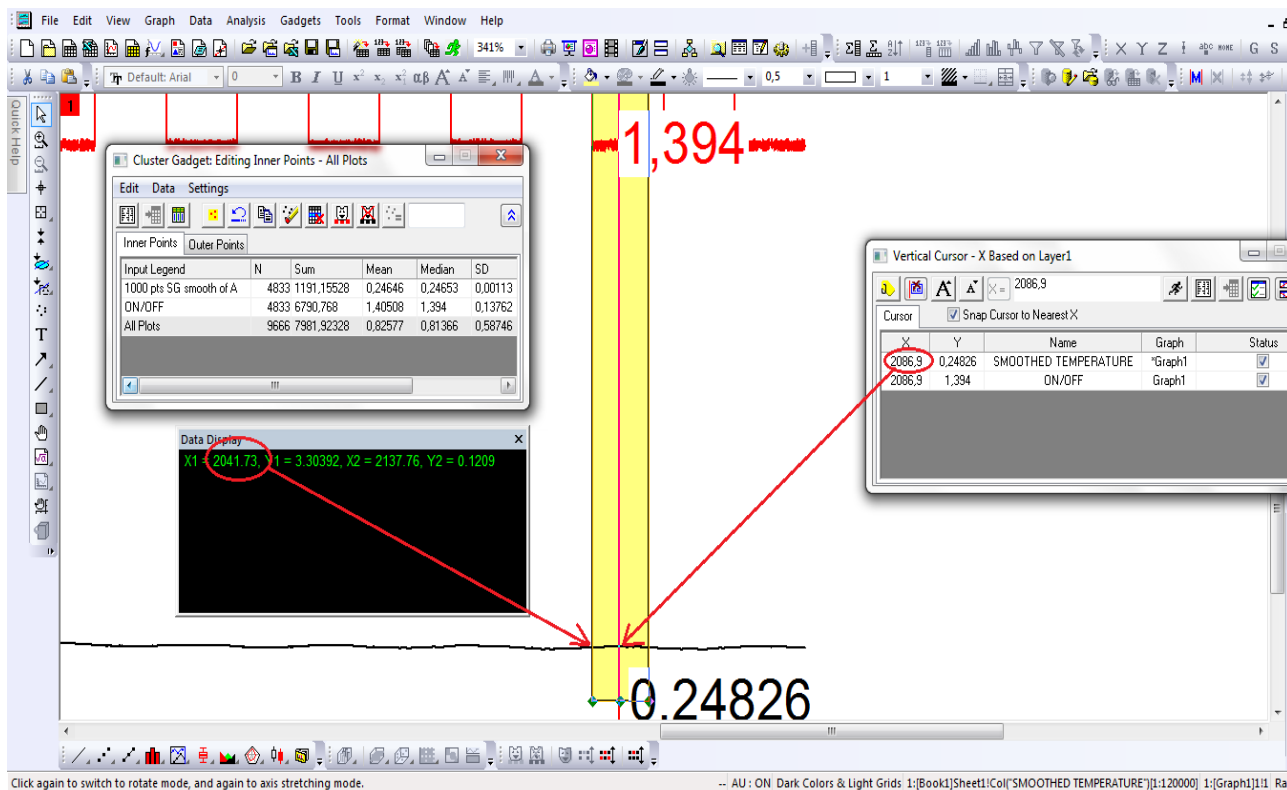


Εικόνα 5.22 Γραφικός υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα V65M

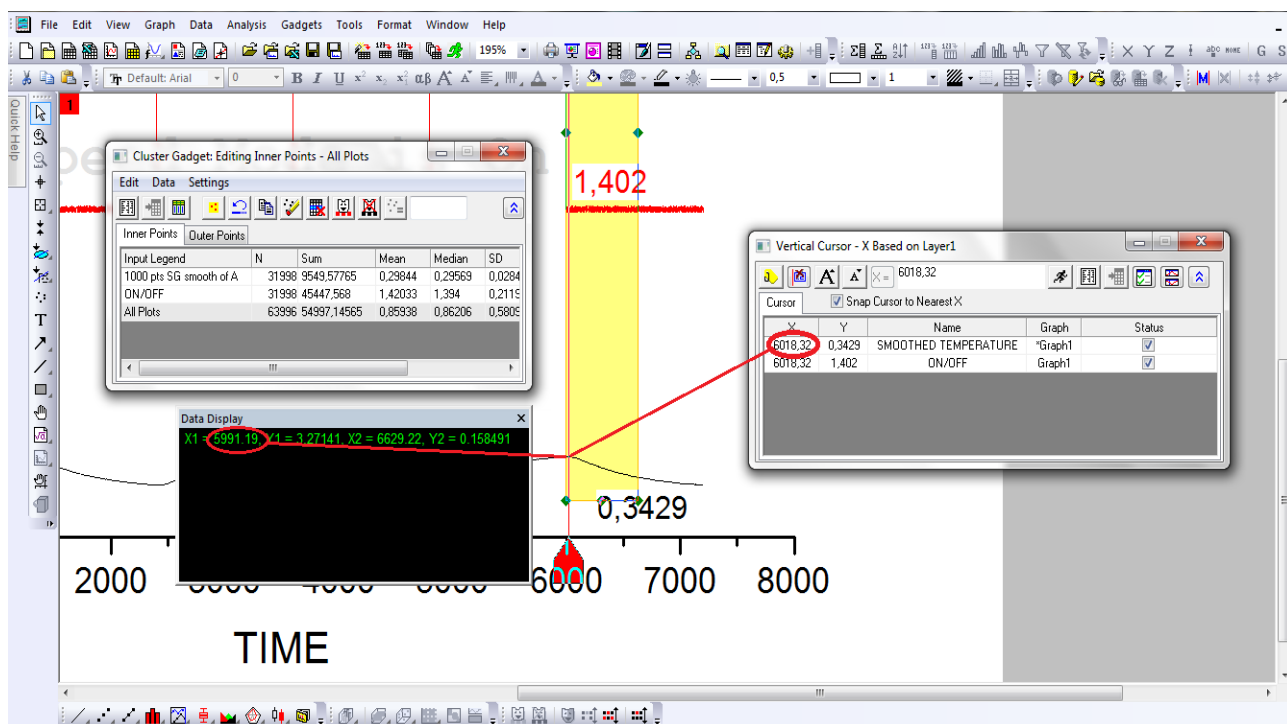


Εικόνα 5.23 Γραφικός υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα V1-510M



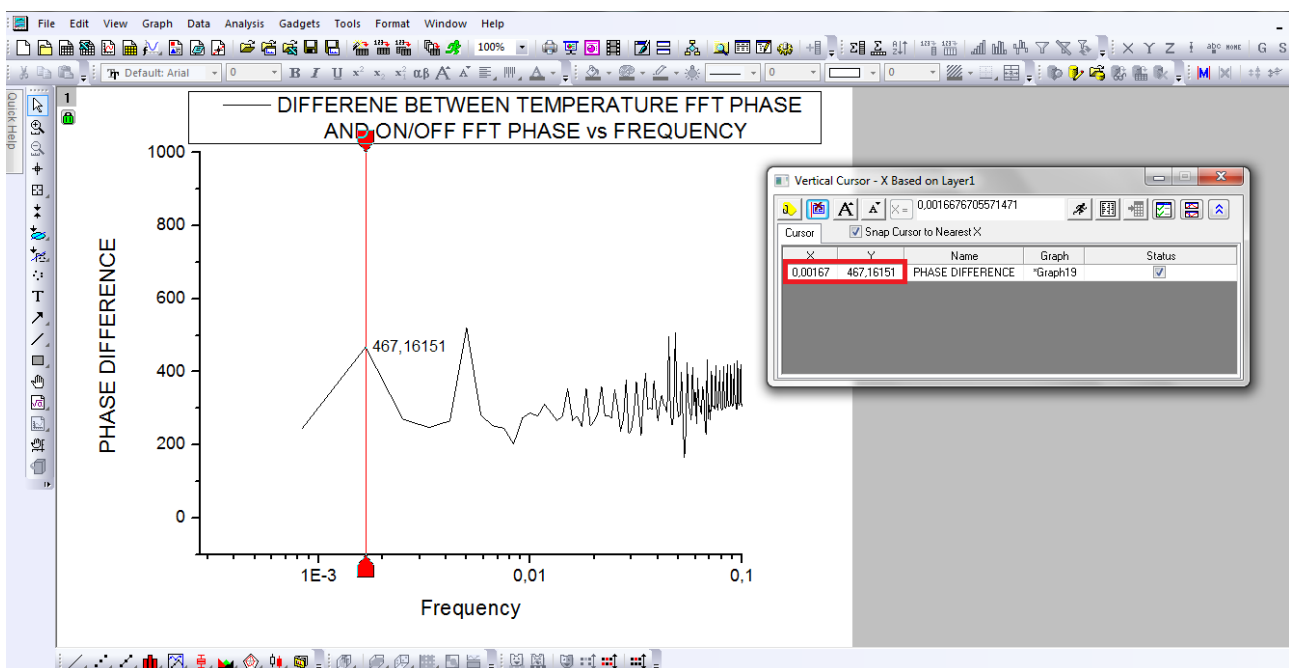


Εικόνα 5.24 Γραφικός υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα 24WH62M

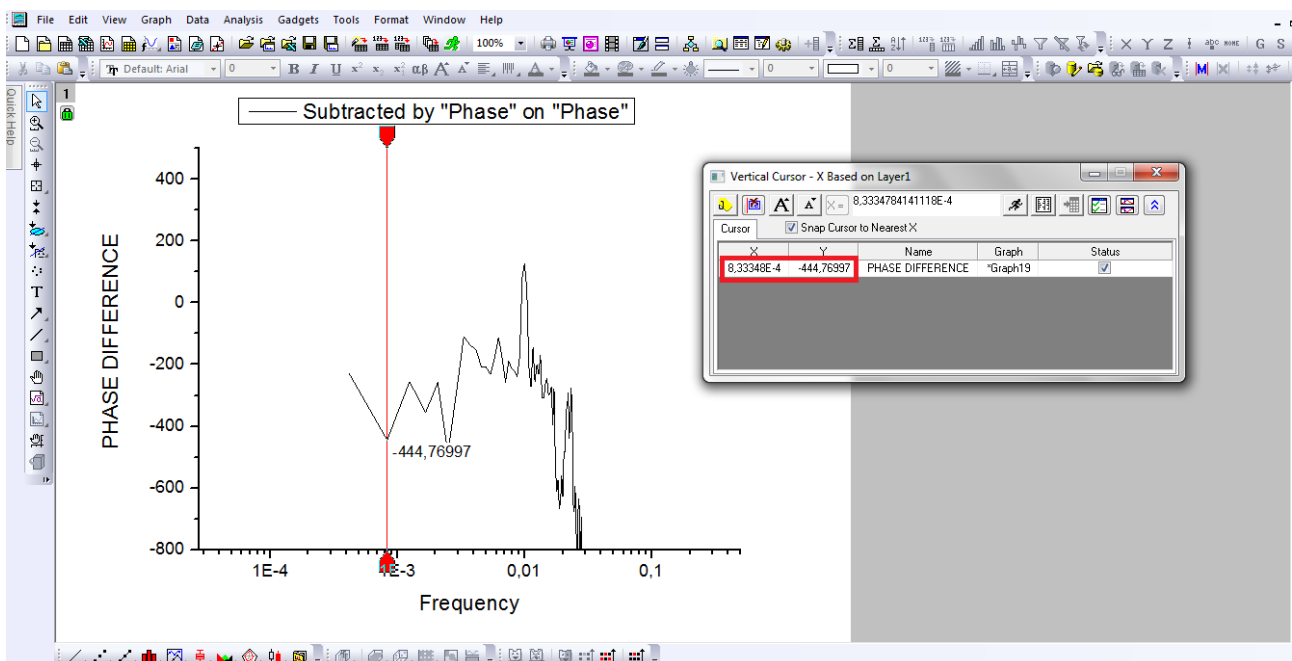


Εικόνα 5.25 Γραφικός υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα 24WH1-520M

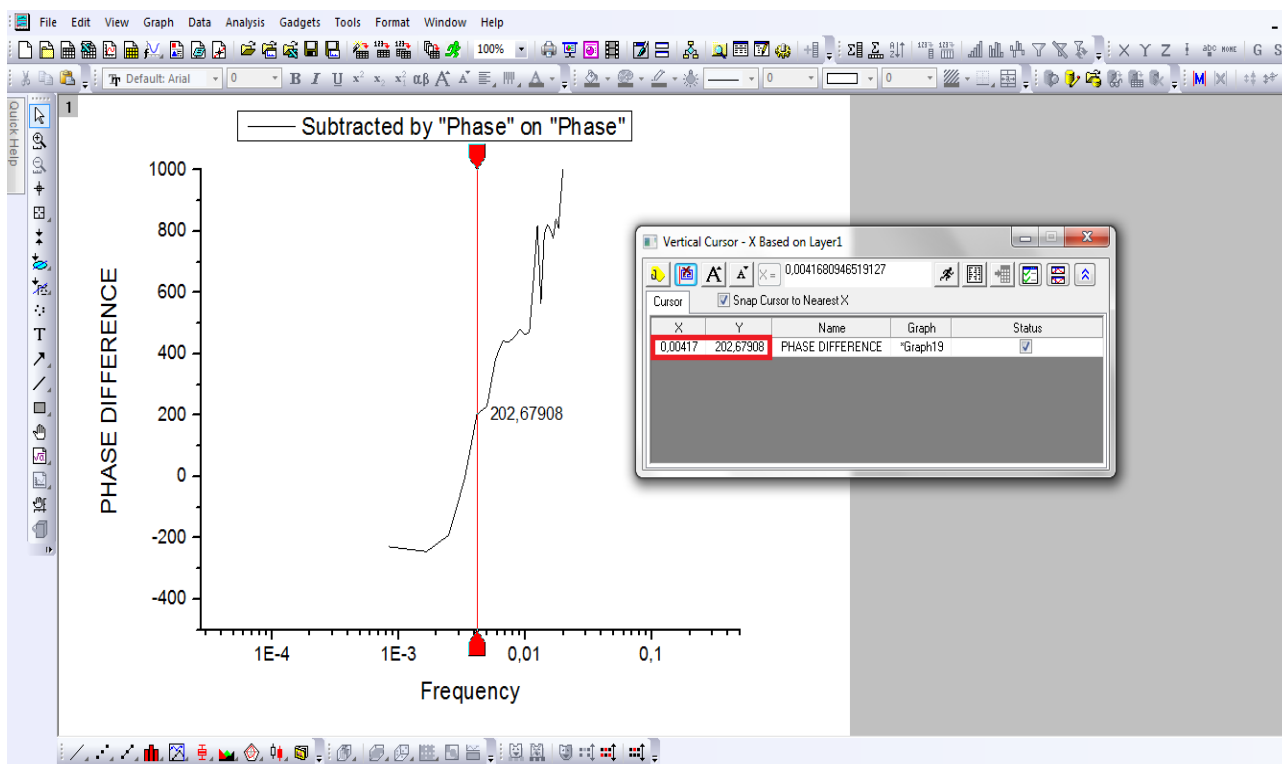
Για τις ίδιες περιπτώσεις έγιναν τα διαγράμματα υπολογισμού της διαφοράς φάσης των δύο σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων με τη χρήση του μετασχηματισμού *Fourier* (FFT). Η παράθεσή τους γίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 5.26, 5.27, 5.28 & 5.29).



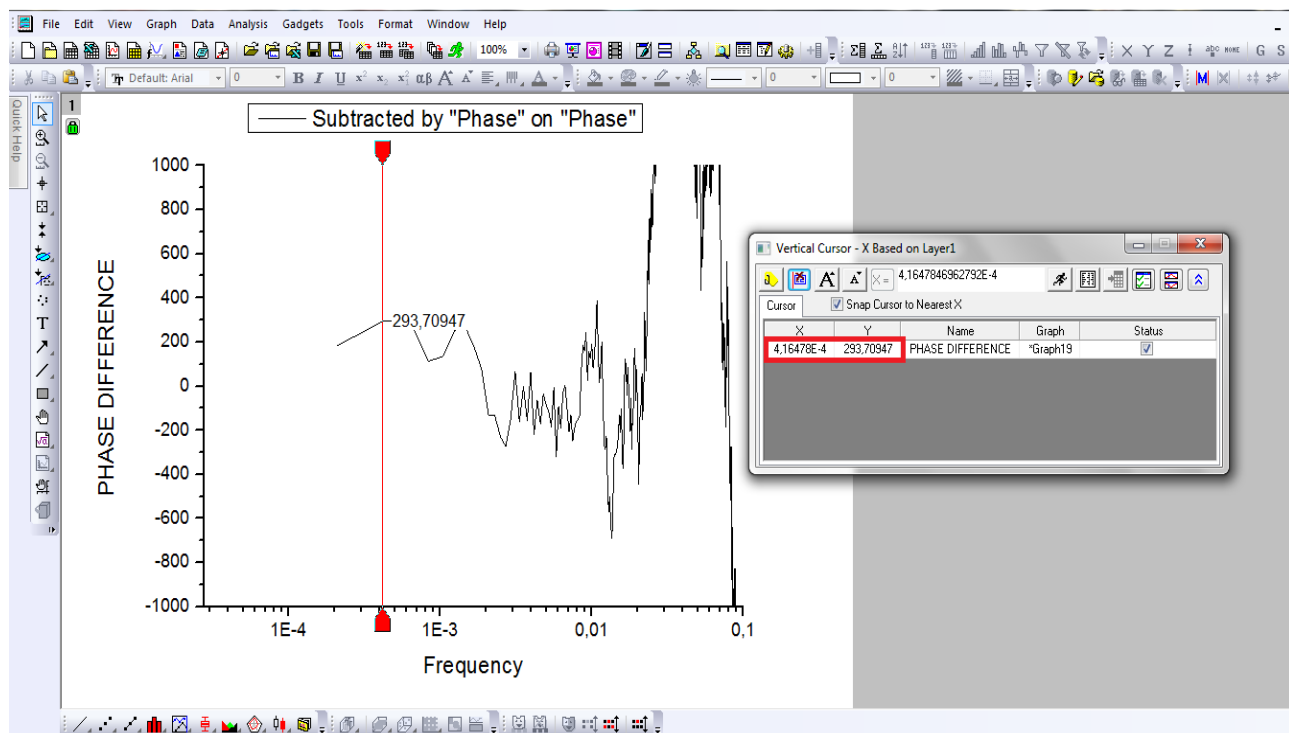
Εικόνα 5.26 FFT υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα V65M



Εικόνα 5.27 FFT υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα V1-510M



Εικόνα 5.28 FFT υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα 24WH62M



Εικόνα 5.29 FFT υπολογισμός της φάσης απόκρισης του συστήματος για το πείραμα 24WH1-520M

Οι τιμές όλων των υπολογισμών τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο (μέσω διαγραμμάτων και μετασχηματισμού *Fourier*) καταγράφονται αναλυτικότερα στις στήλες των πινάκων (Πίνακες 5.8, 5.9, 5.10 & 5.11) που ακολουθούν.

Θεωρητική τιμή διαφοράς φάσης (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (sec)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 2 (°)	FFT τιμή διαφοράς φάσης (°)	Συχνότητα σήματος f (Hz)	Πείραμα	$\omega \cdot \tau$ (rad)
87,57	35,92	107,76	197,76	156,22	0,0083	V61M	23,5687
85,15	34,06	51,09	141,09	151,19	0,004166	V62M	11,7866
78,03	36,41	21,85	111,85	107,39	0,001667	V65M	4,7155
66,7	25,77	7,73	97,73	80,67	0,000833	V610M	2,3555
57,53	15,42	11,51	93,08	65,88	0,000556	V615M	1,5718
49,72	11,93	7,46	91,79	53,89	0,0004166	V620M	1,1800
43,27	6,05	5,19	90,73	46,6	0,0003333	V625M	0,9413
38,09	3,56	3,81	90,36	40,67	0,0002777	V630M	0,7837

Πίνακας 5.8 Οι τιμές της φάσης απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 48 Watt, κάθετου *heat pipe* & τάσης *fan* 6 Volts

Θεωρητική τιμή διαφοράς φάσης (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (sec)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 2 (°)	FFT τιμή διαφοράς φάσης (°)	Συχνότητα σήματος f (Hz)	Πείραμα	$\omega \cdot \tau$ (rad)
87,90	30,56	91,68	181,68	140,89	0,0083	V1-51M	27,2909
85,81	38,11	57,17	147,16	151,66	0,004166	V1-52M	13,6454
79,62	30,47	18,29	108,28	108,99	0,001667	V1-55M	5,4582
69,86	21,18	6,35	96,35	84,78	0,000833	V1-510M	2,7274
61,21	24,67	4,93	94,93	70,33	0,000556	V1-515M	1,8200
53,8	12,99	1,95	91,95	59,82	0,0004166	V1-520M	1,3663
47,46	17,12	2,05	92,05	51,97	0,0003333	V1-525M	1,0899
42,22	10,36	1,04	91,04	45,92	0,0002777	V1-530M	0,9074

Πίνακας 5.9 Οι τιμές της φάσης απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 48 Watt, κάθετου *heat pipe* & τάσης *fan* 1,5 Volts



Θεωρητική τιμή διαφοράς φάσης (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (sec)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 2 (°)	FFT τιμή διαφοράς φάσης (°)	Συχνότητα σήματος f (Hz)	Πείραμα	$\omega \cdot \tau$ (rad)
87,12	57,15	85,73	175,73	157,37	0,004166	24WH62M	19,9074
75,89	35,16	10,55	100,55	90,27	0,000833	24WH610M	3,9784
63,35	14,69	2,20	92,20	64,82	0,0004166	24WH620M	1,9930
52,93	18,19	1,82	91,82	52,15	0,0002777	24WH630M	1,3236

Πίνακας 5.10 Οι τιμές της φάσης απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 24 Watt, οριζόντιου *heat pipe* & τάσης *fan* 6 Volts

Θεωρητική τιμή διαφοράς φάσης (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (sec)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 1 (°)	Πειραματική τιμή διαφοράς φάσης 2 (°)	FFT τιμή διαφοράς φάσης (°)	Συχνότητα σήματος f (Hz)	Πείραμα	$\omega \cdot \tau$ (rad)
87,0	48,84	73,26	163,26	158,33	0,004166	24WH1-52M	19,1081
75,33	29,93	8,98	98,98	92,10	0,000833	24WH1-510M	3,8187
62,4	22,79	3,42	93,42	66,23	0,0004166	24WH1-520M	1,9130
51,79	20,3	2,03	92,03	52,80	0,0002777	24WH1-530M	1,2705

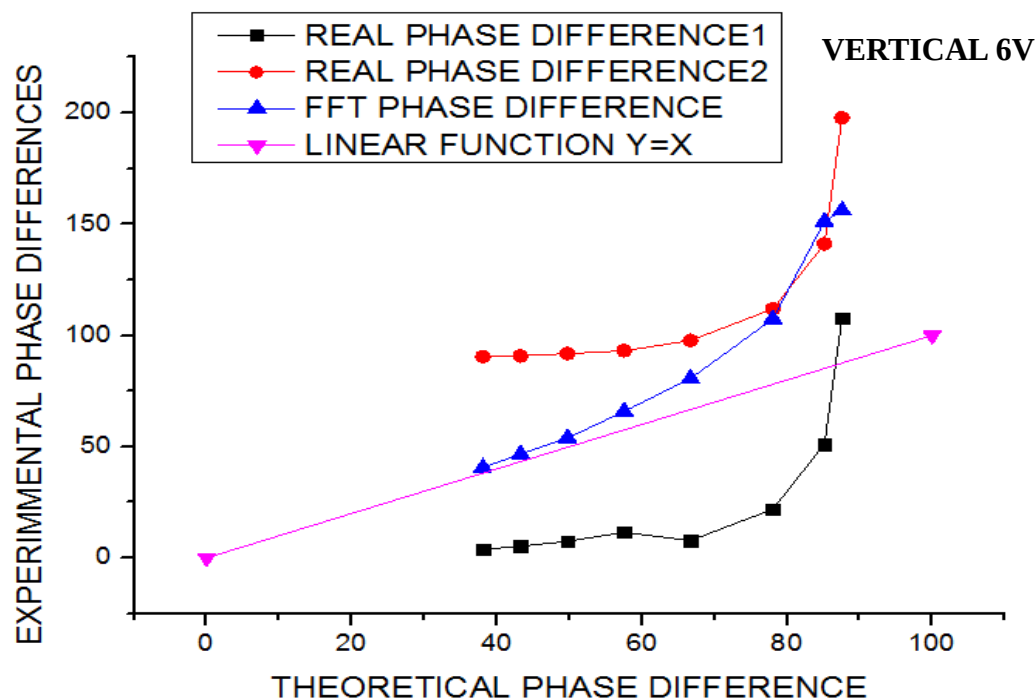
Πίνακας 5.11 Οι τιμές της φάσης απόκρισης για όλα τα πειράματα ισχύος εισόδου 24 Watt, οριζόντιου *heat pipe* & τάσης *fan* 1,5 Volts

Οι διαγραμματικές μετρήσεις της διαφοράς φάσης των δύο σημάτων στα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικά σημεία αναφοράς. Στη πρώτη περίπτωση, η φάση υπολογίστηκε όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.22, 5.23, 5.24 & 5.25 από το άκρο του παλμού του σήματος ισχύος- εισόδου (2<sup>η</sup> & 3<sup>η</sup> στήλη δεδομένων των παραπάνω πινάκων). Στη δεύτερη περίπτωση, ο ίδιος υπολογισμός έλαβε χώρα από το μέσο του παλμού του σήματος (4<sup>η</sup> στήλη δεδομένων των παραπάνω πινάκων). Αυτό έγινε με σκοπό να διερευνηθεί ποιος ήταν ο βέλτιστος γραφικός τρόπος εύρεσης της διαφοράς φάσης ο οποίος και θα προσέγγιζε καλύτερα τα τελικά αποτελέσματα τόσο της θεωρίας όσο και της μεθόδου υπολογισμού με τη χρήση του μετασχηματισμού *Fourier* (FTT).

Όλα τα δεδομένα με τις υπολογισμένες τιμές των φάσεων των δύο σημάτων για όλα τα σενάρια φόρτισης του πυρήνα και με τους τρεις τρόπους υπολογισμού τοποθετούνται σε κοινά διαγράμματα (Εικόνες 5.30, 5.31, 5.32 & 5.33) για καλύτερη σύγκριση και σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, οι κόκκινες καμπύλες αναπαριστούν τη διαφορά φάσης των σημάτων με σημείο αναφοράς υπολογισμού το μέσο του παλμού, όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

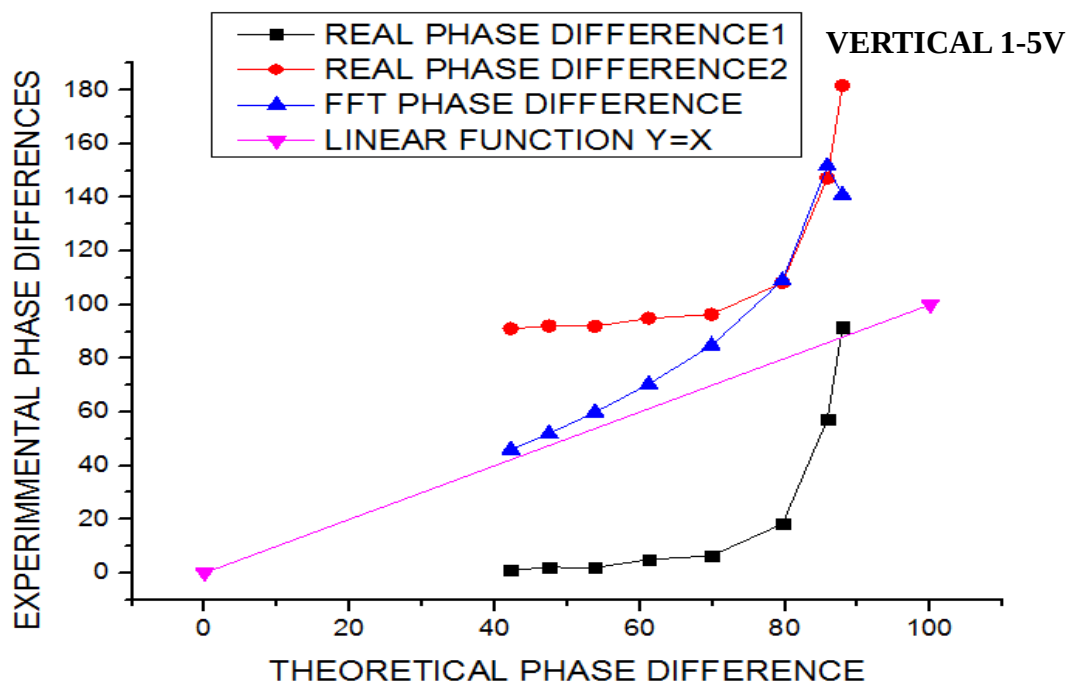


1



Εικόνα 5.30 Σύγκριση των θεωρητικών & πειραματικών τιμών της φάσης απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (V6)

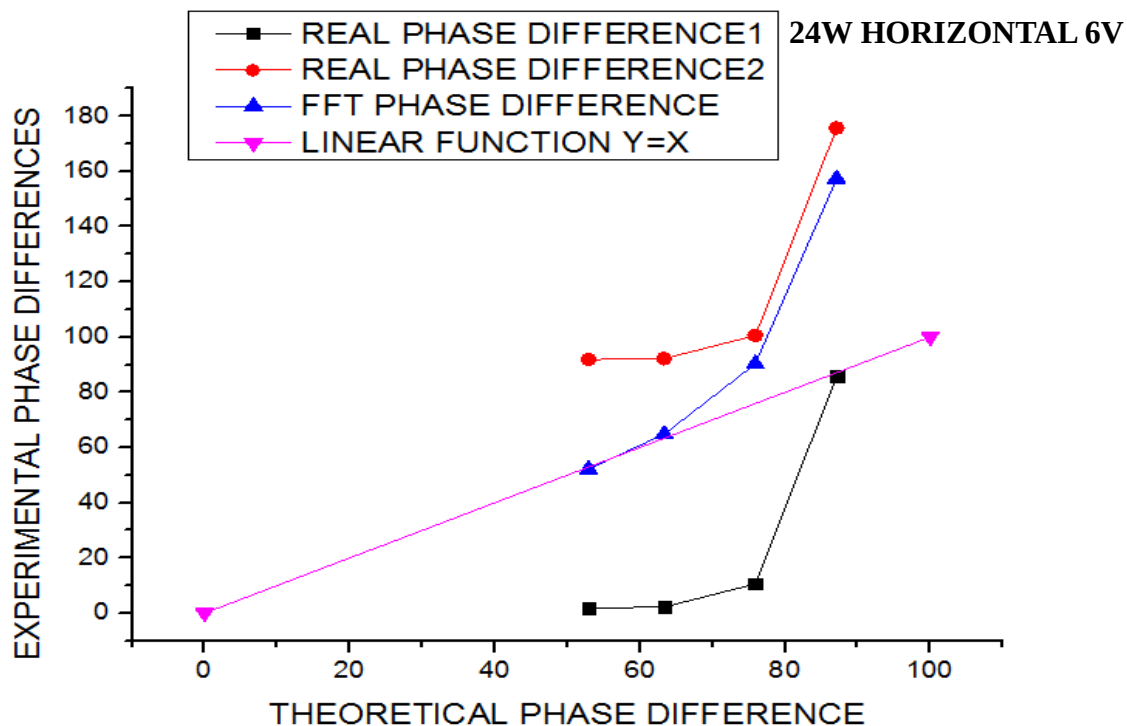
1



Εικόνα 5.31 Σύγκριση των θεωρητικών & πειραματικών τιμών της φάσης απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (V1,5)

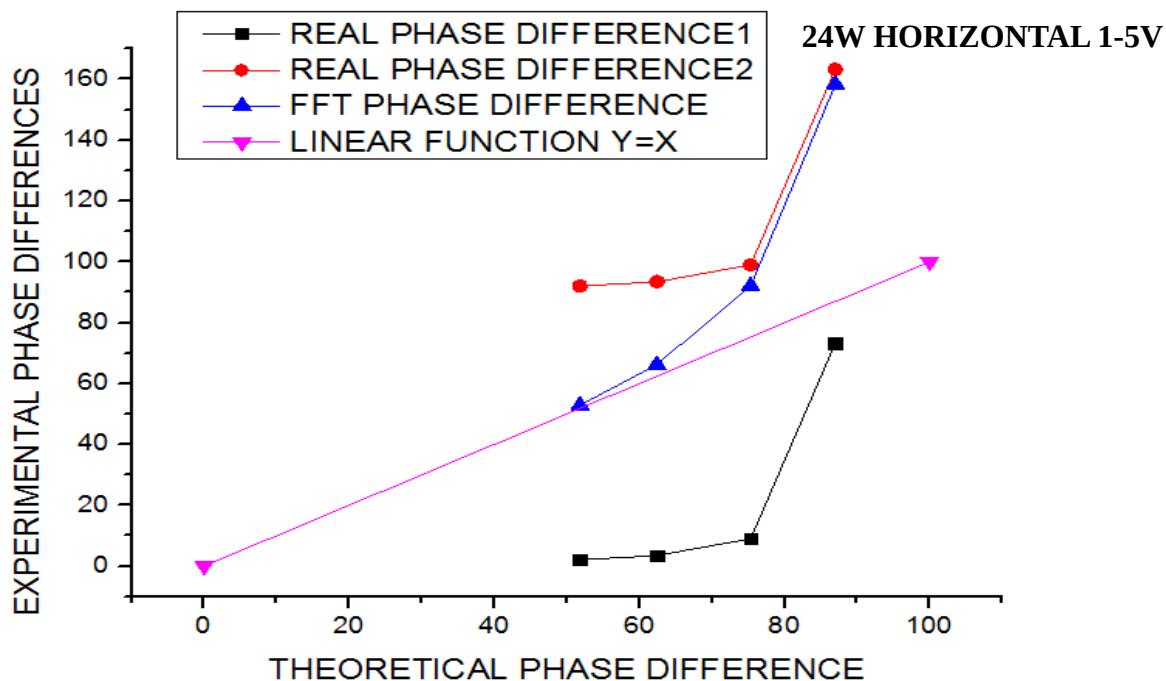


1



Εικόνα 5.32 Σύγκριση των θεωρητικών & πειραματικών τιμών της φάσης απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (24WH6)

1



Εικόνα 5.33 Σύγκριση των θεωρητικών & πειραματικών τιμών της φάσης απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος (24WH1,5)

Από τη λεπτομερή μελέτη των παραπάνω γραφικών παραστάσεων μπορούν να επισημανθούν τρία συμπεράσματα. Το πρώτο και κυριότερο είναι η ύπαρξη σύγκλισης μεταξύ των πειραματικά υπολογισμένων τιμών της φάσης απόκρισης και των αντίστοιχων θεωρητικών τιμών αυτής. Ουσιαστικά, παρατηρείται μία αύξηση της φάσης του αποκρινόμενου σήματος καθώς η συχνότητα εισόδου αυξάνεται και για τις τρεις περιπτώσεις (θεωρητική, διαγραμματική & μέσω του μετασχηματισμού *Fourier*), η οποία μάλιστα είναι αρκετά όμοια σε τάξη μεγέθους και ρυθμό αύξησης, όπως φαίνεται και στα προηγούμενα διαγράμματα. Αυτή η ομοιότητα αποτελεί στοιχείο μέσω του οποίου μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά, όσον αφορά τη φάση του αποκρινόμενου σήματος του υπό μελέτη συστήματος, προσεγγίζει αυτήν ενός συστήματος  $1^{\text{ης}}$  τάξεως. Η απόκλιση αυτών δε, είναι αναμενόμενη σε κάποιο βαθμό διότι στους θεωρητικούς υπολογισμούς υποτέθηκε σήμα διέγερσης ημιτονοειδούς μορφής, γεγονός το οποίο προσομοιάζει αλλά δεν αντιγράφει πιστά τη πραγματική διέγερση του συστήματος.

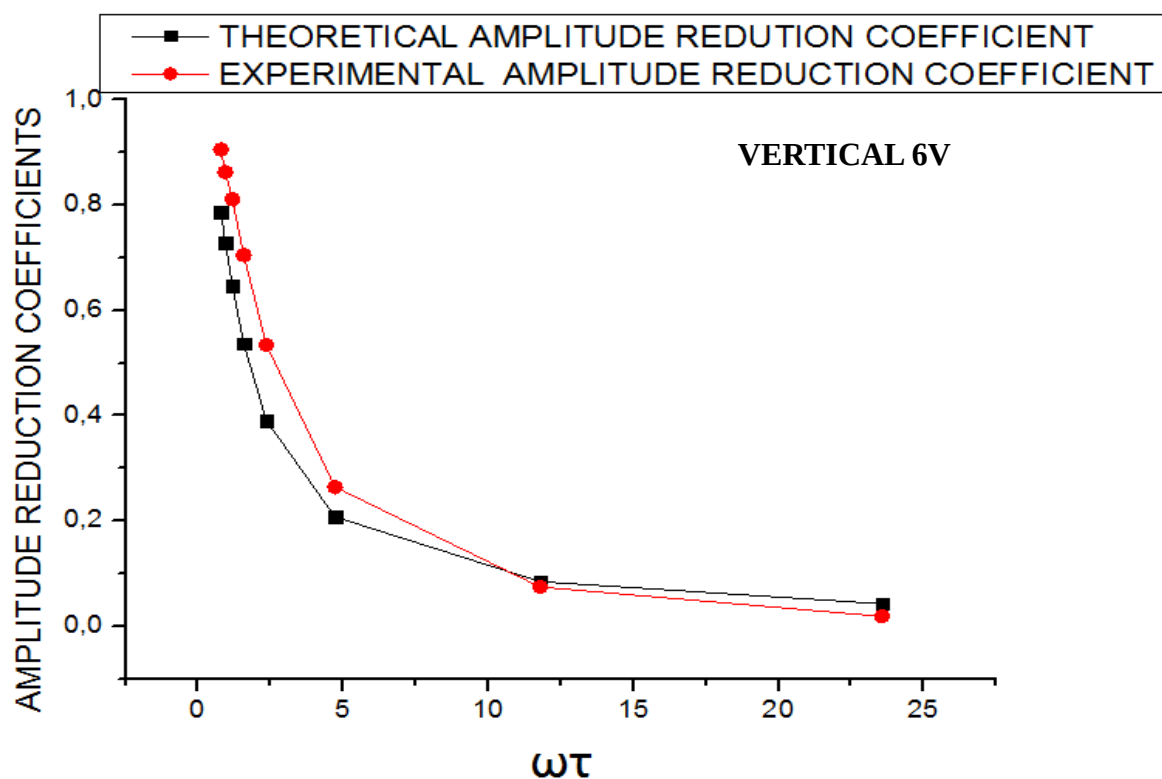
Ένα δεύτερο συμπέρασμα που θα μπορούσε να γίνει αντιληπτό είναι ότι η προαναφερθείσα προσέγγιση είναι αρκετά πιστή στη θεωρία για τις περιπτώσεις των χαμηλών συχνοτήτων εισόδου. Ιδιαίτερα, σε αυτές παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών της φάσης απόκρισης των δύο σημάτων. Ειδικότερα, η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού με τη χρήση του *FFT* φαίνεται να αποτελεί τη καλύτερη επιλογή για τον όσο το δυνατόν πιο αληθοφανή υπολογισμό της φάσης (καμπύλες με μπλε και ροζ χρώμα). Αυτό, πιθανόν, αποδίδεται στο ότι η ανάλυση των δύο σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων επιτρέπει τη καλύτερη και λεπτομερέστερη συσχέτιση μεταξύ αυτών απ' ότι στη περίπτωση των διαγραμματικών υπολογισμών.

Τέλος, μία τρίτη αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι η μέτρηση της διαφοράς φάσης γραφικά με το δεύτερο τρόπο (έναρξη των μετρήσεων από το μέσο του παλμού) προσεγγίζει περισσότερο την αντίστοιχη μέτρησή της μέσω *FFT*. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερος εμφανής σε μεγάλες διαφορές φάσεις που αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές συχνοτήτων εισόδου των σημάτων (καμπύλες με κόκκινο & μπλε χρώμα).

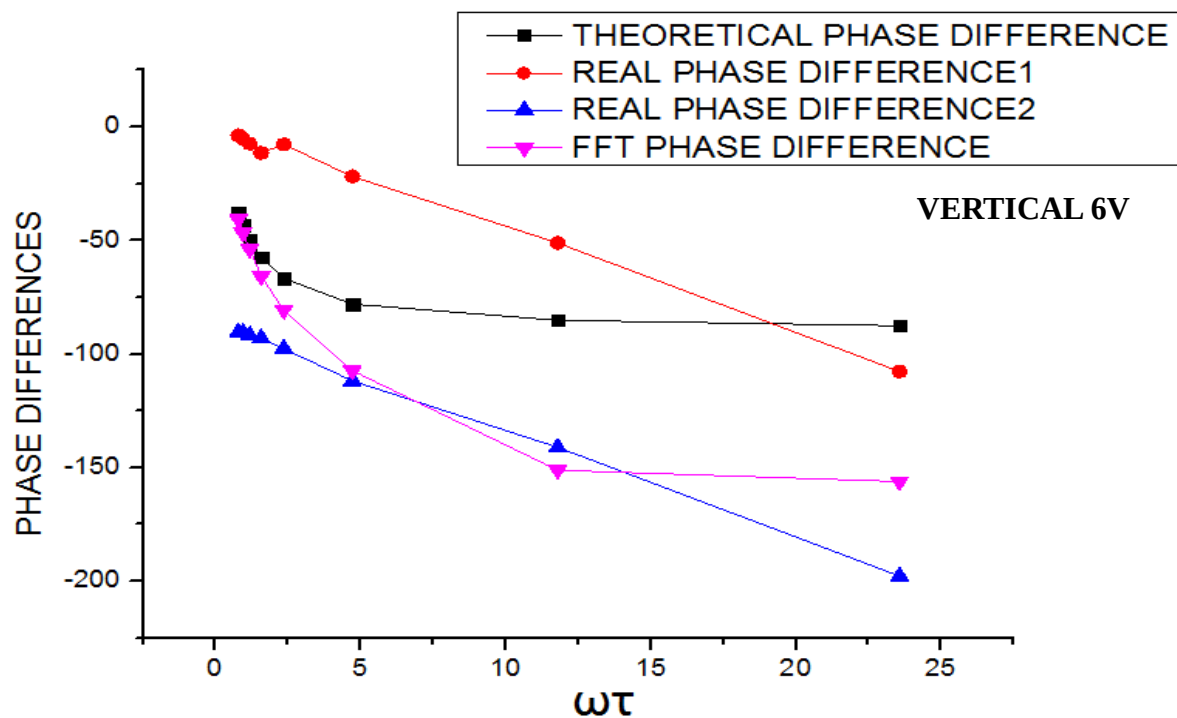
Ολοκληρώνοντας τον εκτενή σχολιασμό των χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς απόκρισης του υπό μελέτη συστήματος, θα παρουσιαστεί μία τελευταία σειρά διαγραμμάτων στα οποία αναδεικνύεται με τον πλέον διακριτό τρόπο η μεγάλη ταύτιση του εν λόγω συστήματος μ' ένα σύστημα  $1^{\text{ης}}$  τάξεως. Σ' αυτές τις γραφικές παραστάσεις (Εικόνες 5.34, 5.35, 5.36 & 5.37), αναπαριστώνται τόσο το πλάτος απόκρισης όσο και η φάση σε συνάρτηση με τον κρίσιμο όρο του συστήματος  $\omega * \tau$ .



1



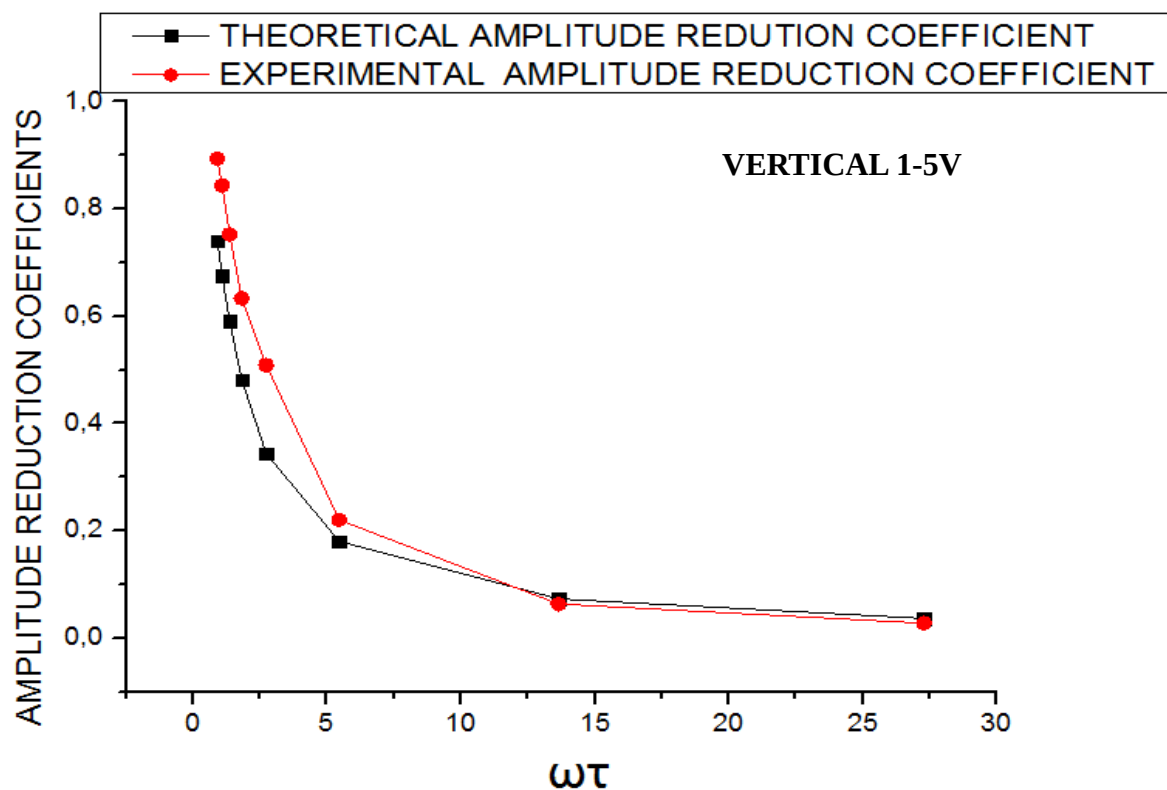
1



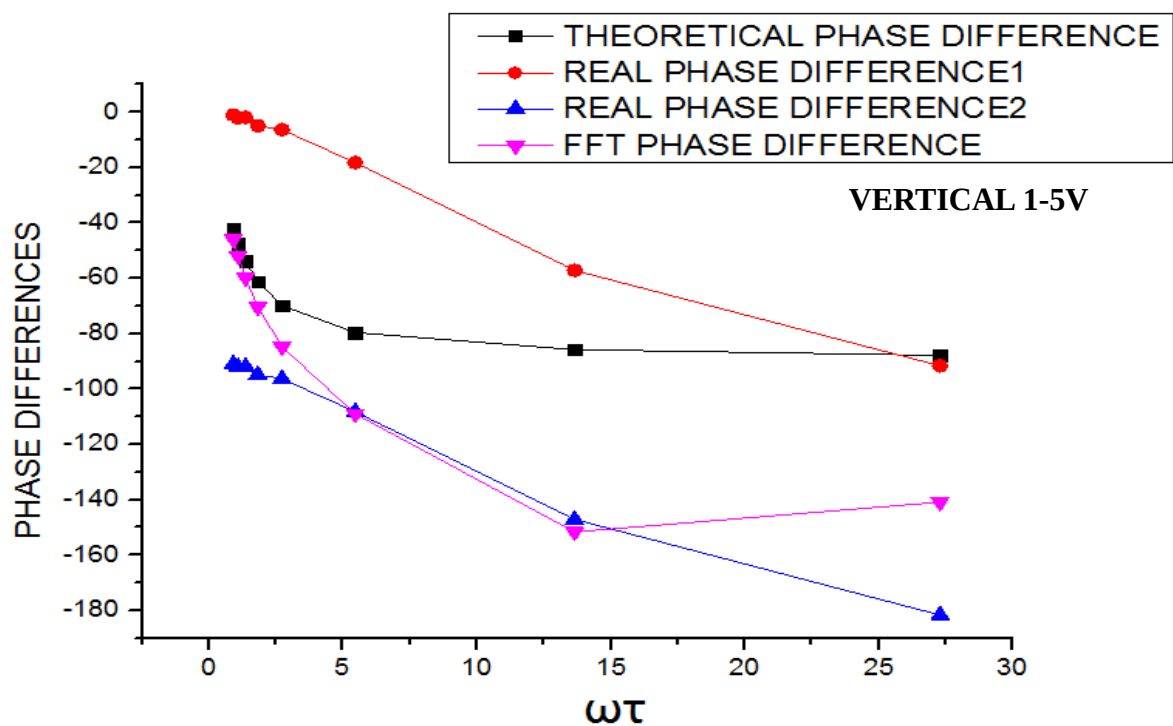
Εικόνα 5.34 Η σύγκριση των χαρακτηριστικών απόκρισης (πλάτους & φάσης) του υπό εξέταση συστήματος μ' ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως (V6)



1



1

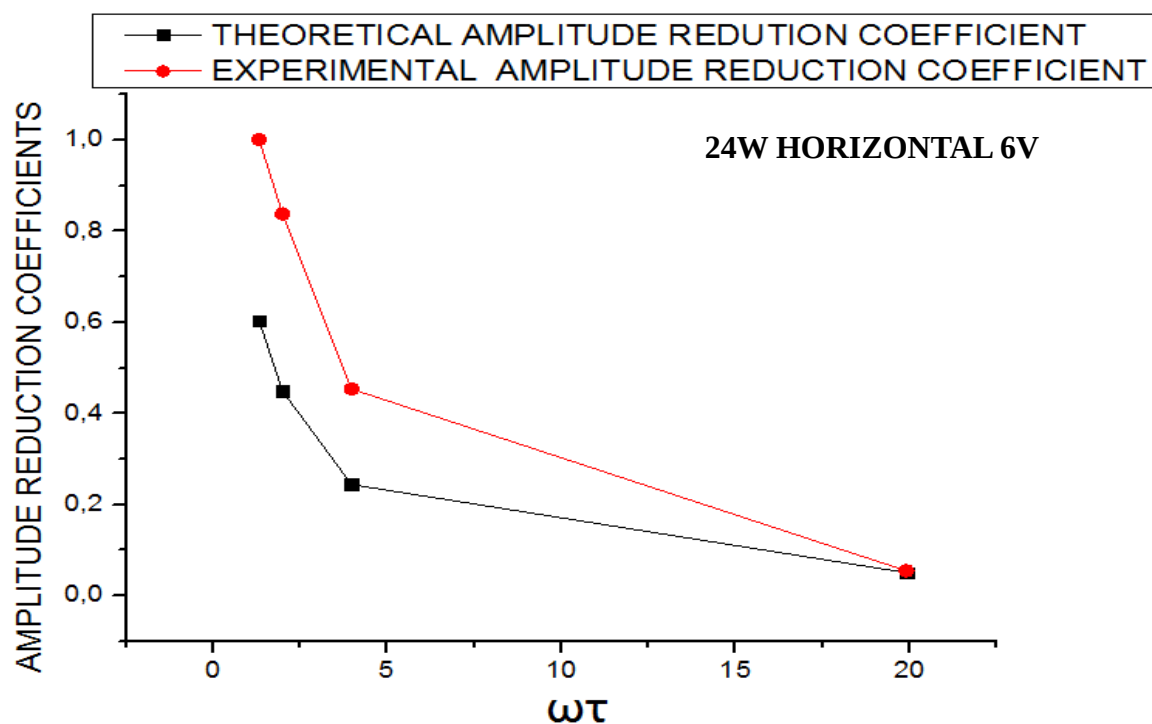


Εικόνα 5.35 Η σύγκριση των χαρακτηριστικών απόκρισης (πλάτους & φάσης) του υπό εξέταση συστήματος μ' ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως (V1,5)

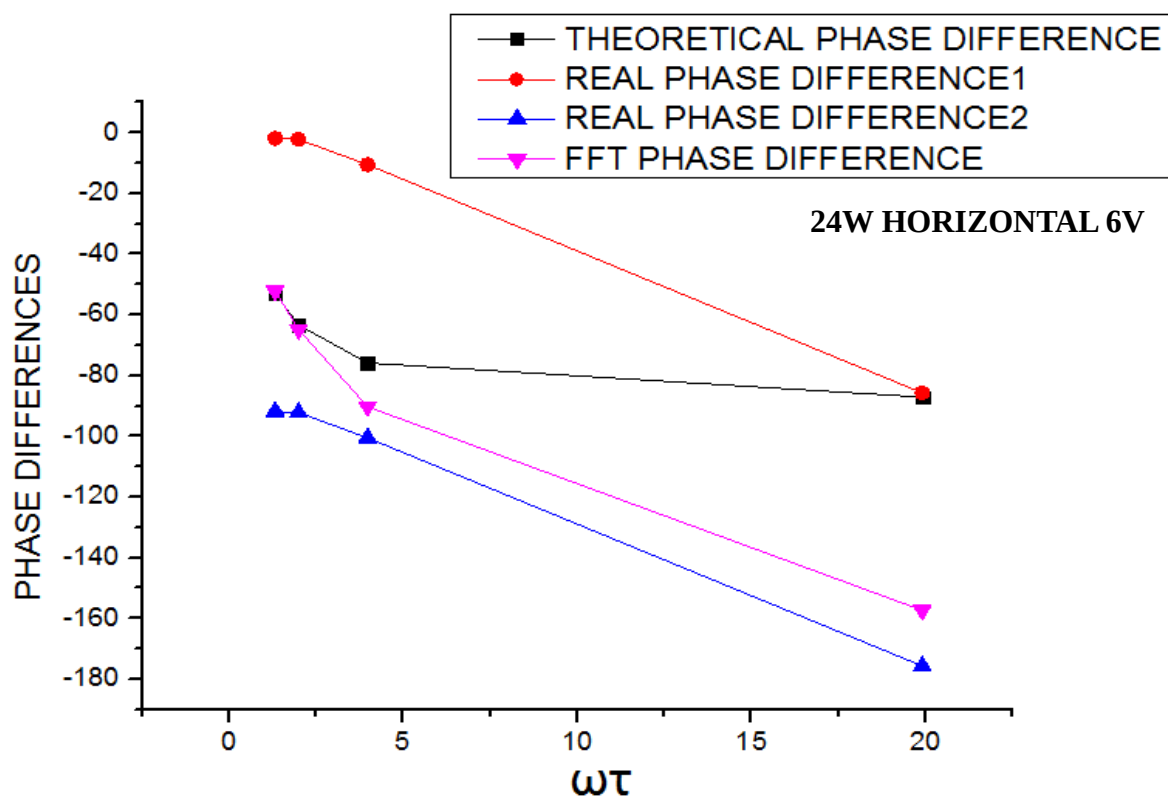




1



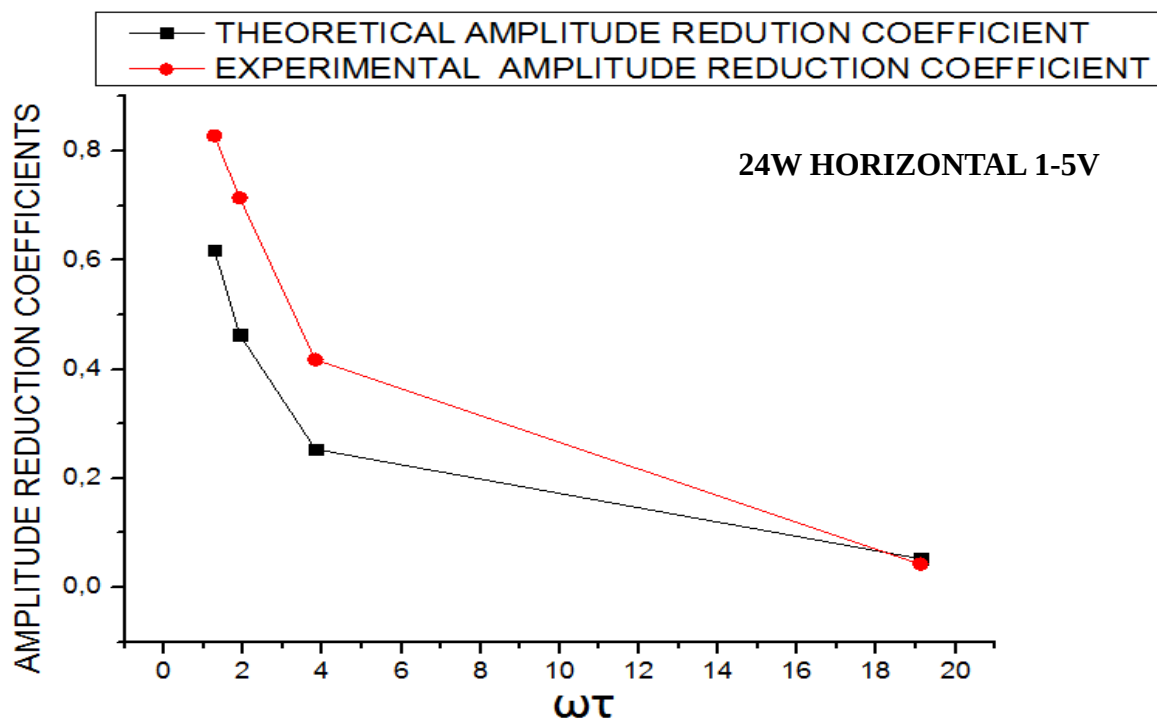
1



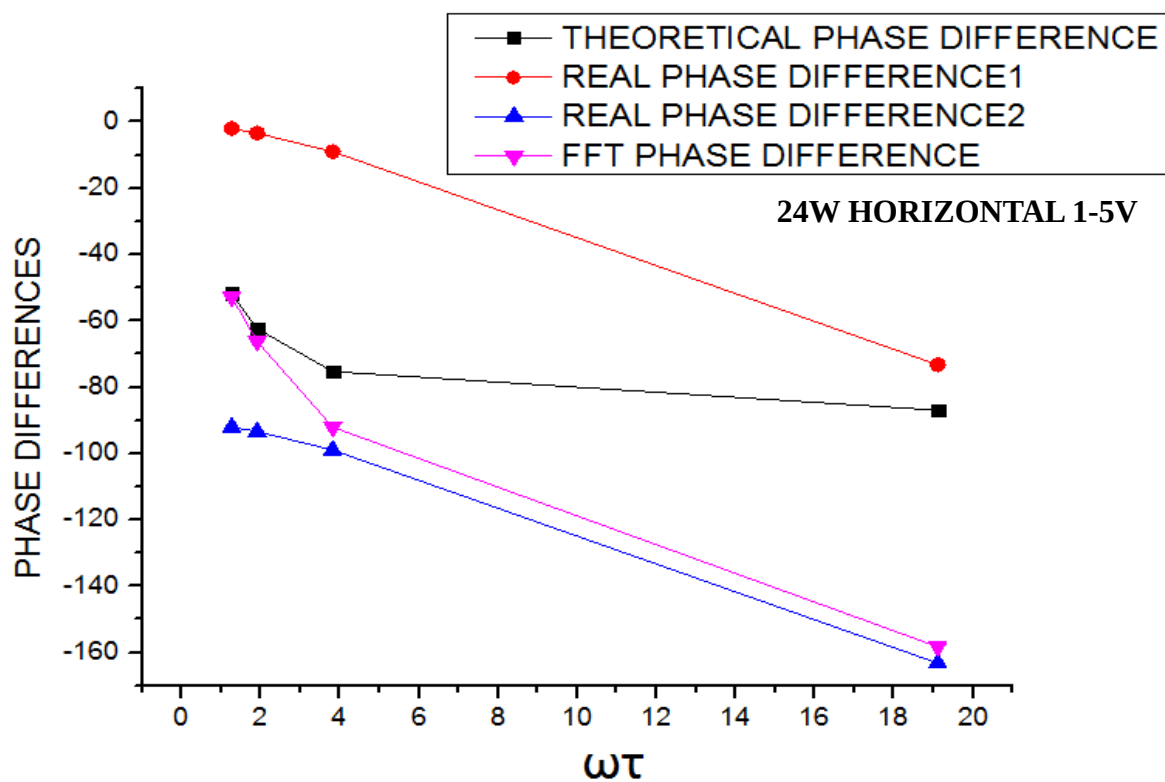
Εικόνα 5.36 Η σύγκριση των χαρακτηριστικών απόκρισης (πλάτους & φάσης) του υπό εξέταση συστήματος μ' ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως (**24WH6**)



1



1



Εικόνα 5.37 Η σύγκριση των χαρακτηριστικών απόκρισης (πλάτους & φάσης) του υπό εξέταση συστήματος μ' ένα σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως (**24WH1,5**)



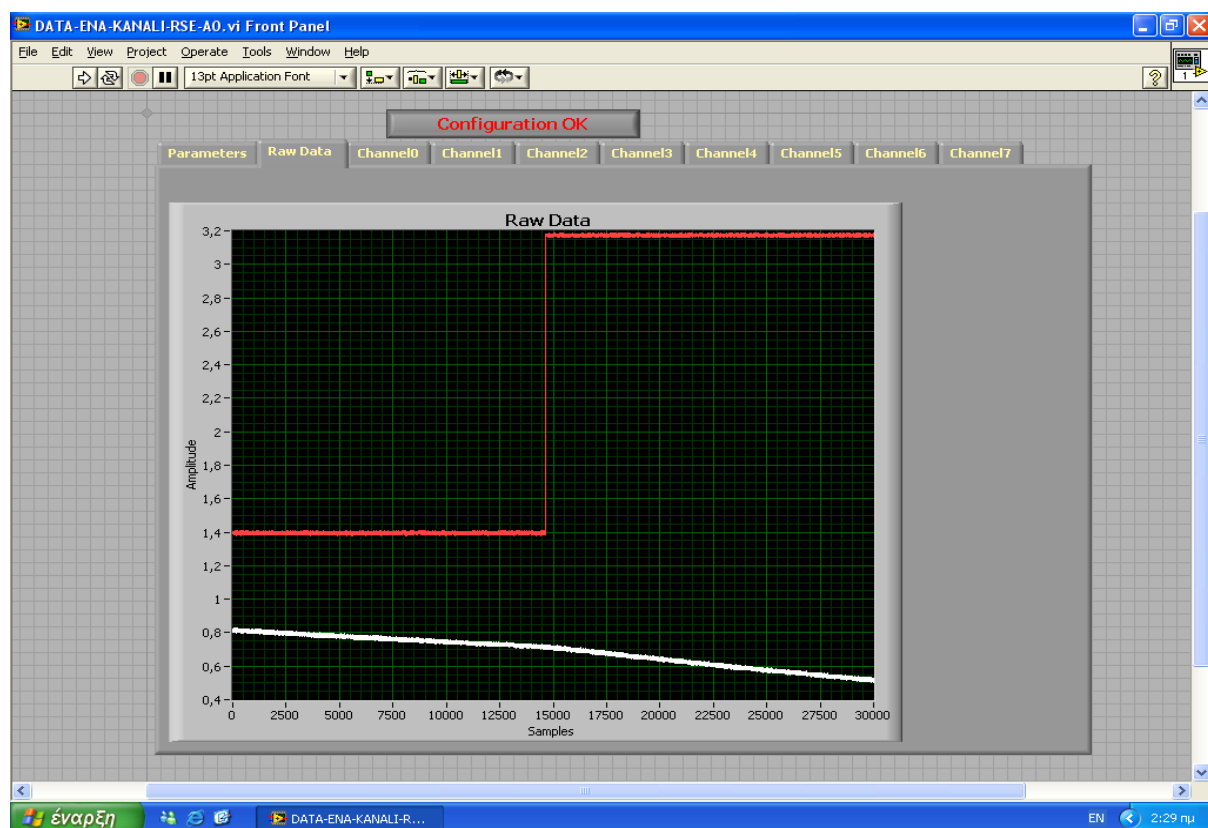
Η μελέτη όλων των παραπάνω διαγραμμάτων οδηγεί με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι το υπό εξέταση σύστημα είναι 1<sup>ης</sup> τάξεως. Ο ισχυρισμός αυτός προκύπτει από τον παραλληλισμό των καμπυλών αυτών με τις αντίστοιχες καμπύλες των γραφημάτων των σχημάτων 2.18 και 2.19 του δεύτερου κεφαλαίου.

Ως μία επιπλέον επιβεβαίωση προηγούμενων σχολιασμών, γίνεται εμφανές ότι το πειραματικό πλάτος απόκρισης προσεγγίζει καλύτερα τη θεωρία σε υψηλές τιμές συχνοτήτων ενώ για τη φάση συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο.

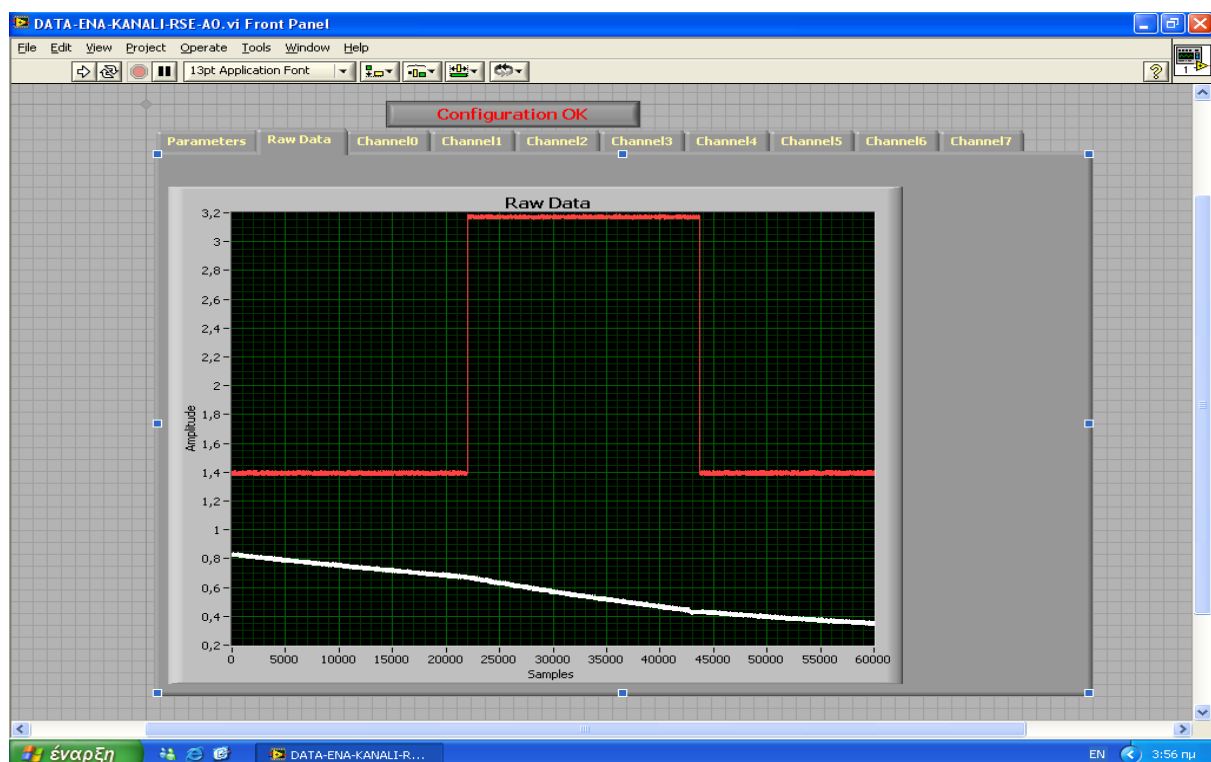
### **5.3 Ψυκτική απόδοση του heat pipe ανάλογα με τον προσανατολισμό**

Η τελευταία σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε περιελάμβανε την μελέτη της ψυκτικής απόδοσης του *heat pipe* με βάση τον προσανατολισμό του. Σε αυτά τα σενάρια το χάλκινο δοκίμιο του πυρήνα θερμαινόταν αρχικά σε μία υψηλή θερμοκρασία και στην συνέχεια με τον ανεμιστήρα σε λειτουργία μελετούνταν ο ρυθμός ψύξης. Η καταγραφή ξεκινούσε τη στιγμή που σταματούσε η παροχή ισχύος στο δοκίμιο. Το σύστημα βρισκόταν αρχικά σ' έναν προσανατολισμό (πχ. οριζόντιο) και στη συνέχεια, κάποια στιγμή κατά την εξέλιξη του πειράματος, ο προσανατολισμός του μεταβαλλόταν εσκεμμένα (πχ. σε κάθετο) με σκοπό να παρατηρηθεί η αλλαγή του ρυθμού με τον οποίο ψυχόταν το δοκίμιο σε καθεμιά από τις δύο περιπτώσεις. Η αλλαγή αυτή του προσανατολισμού, για να γίνεται εύκολα αντιληπτή, δηλώνονταν σε αυτά τα πειράματα με την ταυτόχρονη αλλαγή της θέσης του αυτοσχέδιου διακόπτη *On/Off*. Παραδείγματα τέτοιων πειραμάτων, όπως αυτά λήφθηκαν από το *LABVIEW* και πριν την περεταίρω μαθηματική τους επεξεργασία φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα *Raw Data* (Εικόνες 5.38 & 5.39).

Από τις παρακάτω εικόνες ακόμα και πριν γίνει μαθηματική επεξεργασία είναι εμφανής η αρκετά μεγάλη αλλαγή στην κλίση μείωσης της θερμοκρασίας με τον χρόνο όταν ο προσανατολισμός του συστήματος *heat pipe*- πυρήνα μεταβάλλεται. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι και στις δυο παρακάτω περιπτώσεις η τιμή του διακόπτη στη θέση *Off* (1,4V) δηλώνει τον οριζόντιο προσανατολισμό, ενώ η τιμή του διακόπτη στη θέση *On* (3,2V) δηλώνει τον κάθετο. Επίσης, η τιμή της τάσης ισχύος στον ανεμιστήρα ήταν μόνιμα στα 6V.



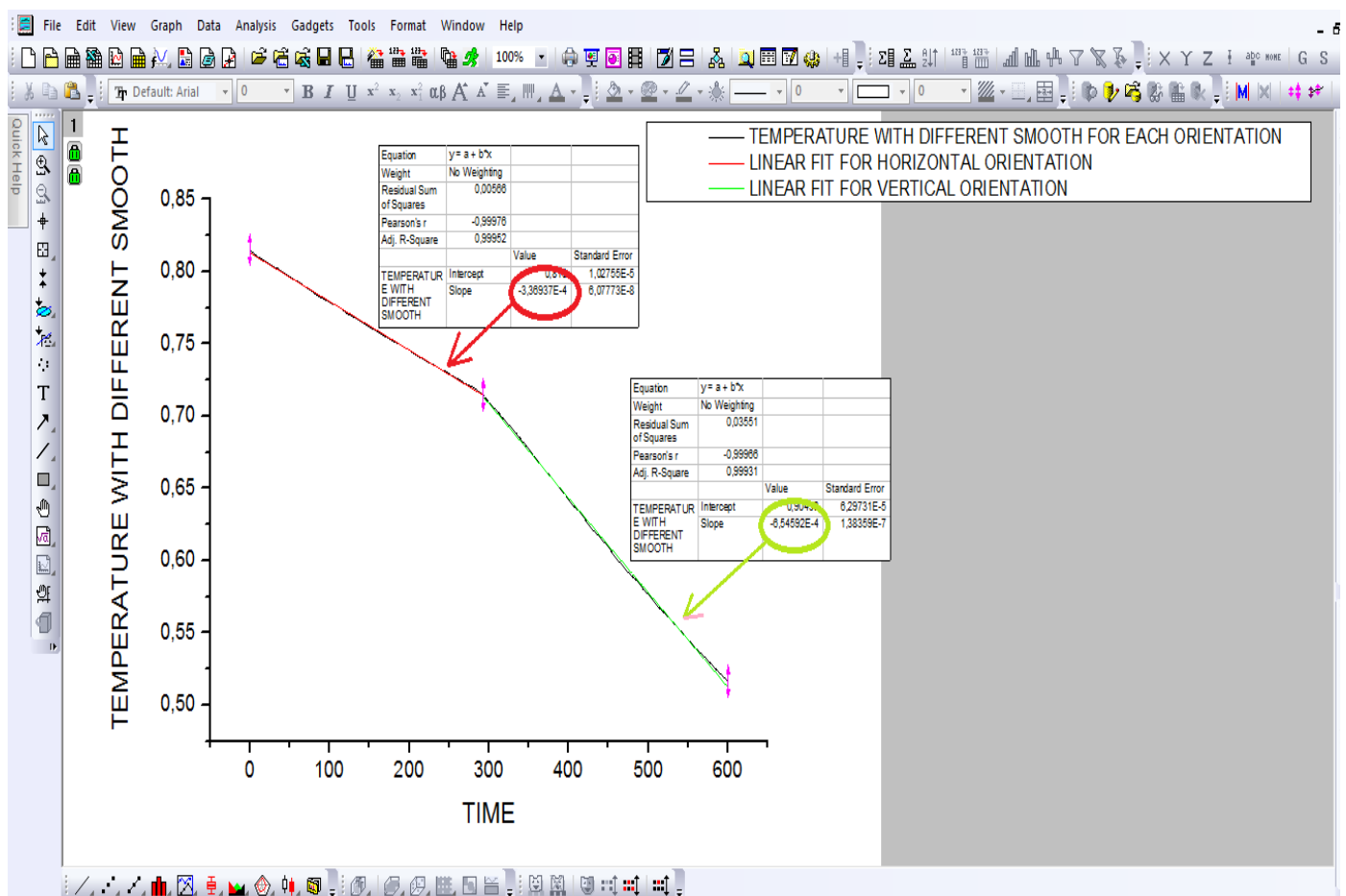
Εικόνα 5.38 Η διαφορά στο ρυθμό ψύξης του πυρήνα με την αλλαγή προσανατολισμού του *heat pipe*



Εικόνα 5.39 Οι εναλλαγές στο ρυθμό ψύξης του πυρήνα με την αλλαγή προσανατολισμών του *heat pipe*

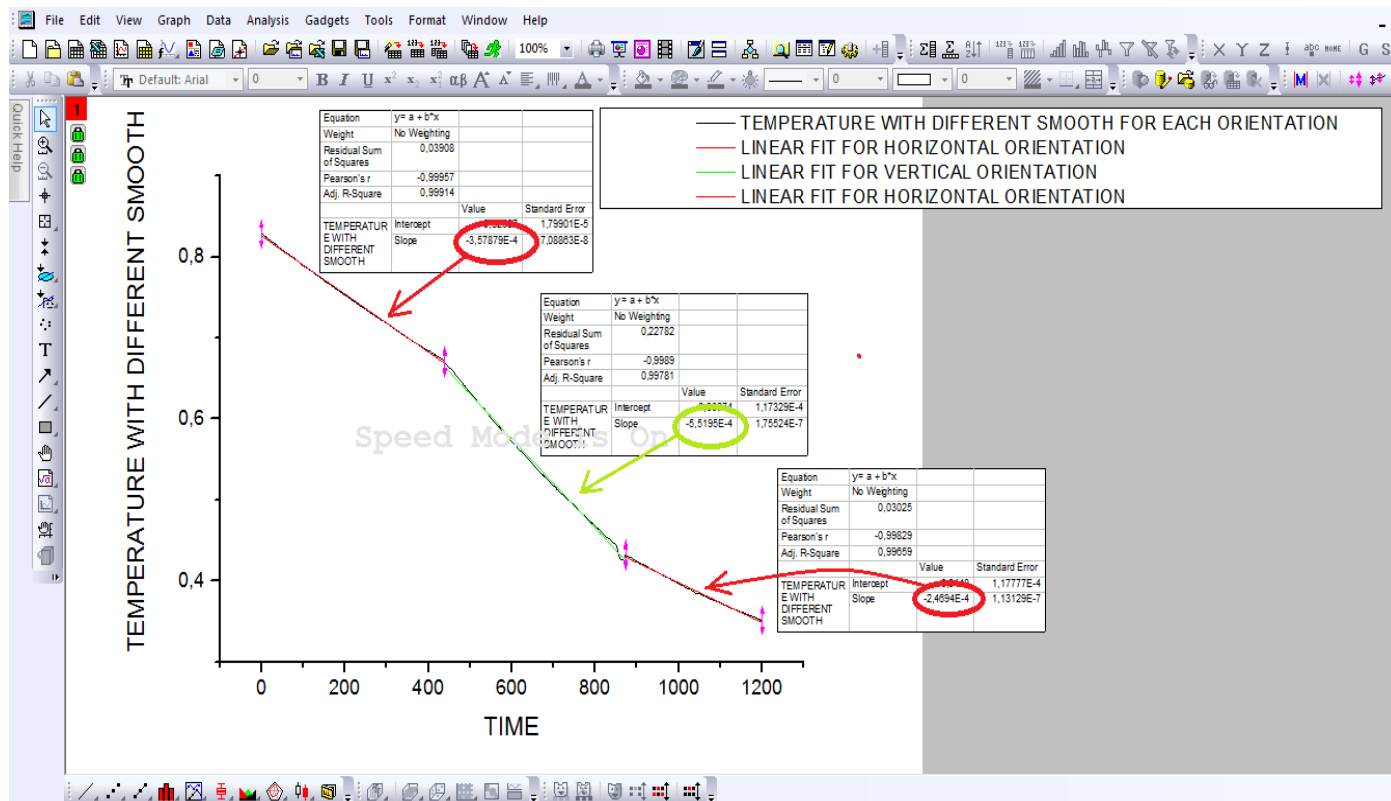
Οι τιμές που ελήφθησαν σε μορφή *.txt* από το *LABVIEW* για αυτά τα πειράματα εισήχθησαν σε κατάλληλο πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων για τον ακριβή υπολογισμό του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας. Αυτό επιτεύχθηκε με την αρχική ομαλοποίηση **smoothing** των μετρούμενων τιμών, αλλά για κάθε τμήμα-προσανατολισμό χωριστά, ώστε να μη δημιουργηθεί απώλεια πληροφορίας στα σημεία όπου η καμπύλη των θερμοκρασιών σχηματίζει ακμές.

Στη συνέχεια, έγινε προσεγγιστικά **linear fitting** για κάθε ένα από αυτά τα τμήματα, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα του προγράμματος επεξεργασίας (Εικόνες 5.40 & 5.41).



Εικόνα 5.40 Προσέγγιση του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα με γραμμικές συναρτήσεις (**linear fitting**)





Εικόνα 5.41 Προσέγγιση του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα με γραμμικές συναρτήσεις (*linear fitting*)

Στα παραπάνω διαγράμματα το κάθε τμήμα ψύξης για διαφορετικό προσανατολισμό έχει προσεγγιστεί με μία ευθεία. Η γραμμική προσέγγιση, όπως φαίνεται και γραφικά, είναι πολύ καλή και δίνει την δυνατότητα μέσω του συντελεστή διεύθυνσης *Slope* της κάθε ευθείας να υπολογιστεί ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας για κάθε έναν προσανατολισμό. Όλα τα αριθμητικά δεδομένα τα οποία εξάγονται από τα παραπάνω διαγράμματα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.12)

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	ΕΥΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΥΡΗΝΑ		
	35-45°C	45-65°C	65-85°C
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ( <i>Horizontal</i> )	-0,025°C/sec		-0,034°C/sec -0,036°C/sec
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ( <i>Vertical</i> )		-0,055°C/sec -0,065°C/sec	

Πίνακας 5.12 Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας συναρτήσει του προσανατολισμού και του εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας του *heat pipe*



Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 5.12) το μείον δηλώνει τη μείωση της θερμοκρασίας. Από τα συγκεντρωτικά αυτά αποτελέσματα του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα εύκολα κανείς καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- Για τον ίδιο προσανατολισμό ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας, άρα κι ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας του *heat pipe* είναι μεγαλύτερος όταν η θερμοκρασία λειτουργίας αυτού είναι σε μεγαλύτερα εύρη τιμών θερμοκρασίας.
- Για διαφορετικό προσανατολισμό, ο κατακόρυφος προσανατολισμός είναι πιο αποδοτικός από τον οριζόντιο. Συγκεκριμένα, στον κατακόρυφο προσανατολισμό, ακόμα και για μικρότερα εύρη θερμοκρασιών, ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας, άρα και της απαγωγής θερμότητας από τον πυρήνα, είναι σχεδόν διπλάσιος απ' ότι στον οριζόντιο προσανατολισμό.

Τα δύο πιο πάνω συμπεράσματα έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία του δεύτερου κεφαλαίου. Πιο αναλυτικά, για το πρώτο συμπέρασμα από το Σχήμα 2.20 μπορεί να παρατηρήσει κανείς την άμεση και αναλογική εξάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του *heat pipe* με την ικανότητα απαγωγής θερμότητας αυτού. Επίσης, από τη σχέση 2.40 που αφορά τον περιορισμό λόγω τριχοειδών δυνάμεων, γίνεται εμφανές ότι, όταν ο εξαερωτήρας βρίσκεται κάτω από τον συμπυκνωτή, όπως στη κατακόρυφη θέση της υπό μελέτη διάταξης, η τιμή τη γωνίας  $\varphi$  λαμβάνει αρνητικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού απαγωγής θερμότητας  $\dot{Q}_c$  όπως υπαγορεύεται από την παραπάνω σχέση.

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα – Προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

- Ο χρόνος θερμικής διάχυσης για κάθε περίπτωση ψυχρής εκκίνησης *COLDSTART* ήταν κατά μέσο όρο σταθερός συμβαδίζοντας με τη θεωρητική εκτίμηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας  $\alpha$  εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του δοκιμίου. Η όποια απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών έχει να κάνει με τη παρουσία του *soldering station*.
- Η χρονική σταθερά  $\tau$ , άρα κι ο χρόνος μετάβασης σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, επηρεάζεται από την ισχύ εισόδου στο σύστημα και την τάση τροφοδοσίας στον ανεμιστήρα.
- Οι μετρήσεις της τελικής θερμοκρασίας ισορροπίας του πυρήνα στα πειράματα *COLDSTART* πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές ημέρες και με διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε φορά. Ο σκοπός αυτού ήταν η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας δωματίου στη θέρμανση του πυρήνα όπου και παρατηρήθηκε αναλογική σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών.
- Κατά τη διεξαγωγή των αρχικών διερευνητικών δειγματοληψιών καταγράφηκε δραματική αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα σε οριζόντιο προσανατολισμό και με μέγιστη ισχύ εισόδου στο σύστημα. Αυτή η αδυναμία του αγωγού θερμότητας να κρατήσει τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα πιθανολογείται ότι οφείλεται σε εμφάνιση περιορισμού λόγω βρασμού (***Boiling Limitation***) ο οποίος μείωσε την ικανότητα απαγωγής θερμότητας του *heat pipe*.
- Κατά τη μεταβαλλόμενη φόρτιση του πυρήνα διαπιστώθηκε σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών του συντελεστή μείωσης του πλάτους απόκρισης και των αντίστοιχων θεωρητικών για σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως. Πιο συγκεκριμένα, το πειραματικά υπολογισμένο πλάτος του σήματος απόκρισης προσεγγίζει ικανοποιητικά τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές αυτού, ιδιαίτερα σε πιο υψηλές γωνιακές συχνότητες.



- Επιπλέον, κατά τη μεταβαλλόμενη διέγερση του συστήματος παρατηρήθηκε σύγκλιση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών της φάσης απόκρισης, ιδιαίτερα με τη χρήση της μεθόδου *FFT*, και των αντίστοιχων τιμών της θεωρίας για σύστημα 1<sup>ης</sup> τάξεως. Ειδικότερα, οι πειραματικά μετρούμενες διαφορές φάσης (γραφικά & αναλυτικά μέσω *FFT*) των σημάτων απόκρισης ακολουθούν ικανοποιητικά τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές αυτής, ιδιαιτέρως στις πιο χαμηλές γωνιακές συχνότητες αυτή τη φορά.
- Τα παραπάνω δύο συμπεράσματα σε συνδυασμό με τη μελέτη των διαγραμμάτων πλάτους και φάσης απόκρισης συναρτήσεως του όρου  $\omega \cdot \tau$ , αποτελούν απόδειξη ότι το υπό μελέτη σύστημα ακολουθεί συμπεριφορά συστήματος 1<sup>ης</sup> τάξεως. Αυτός είναι κι ένας απ' τους αντικειμενικούς σκοπούς που τέθηκαν στην αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων μεταβλητού προσανατολισμού του *heat pipe* εντοπίστηκε μεγάλη εξάρτηση μεταξύ της απαγωγικής ικανότητας του αγωγού θερμότητας και της αλλαγής στη κατεύθυνση της πειραματικής διάταξης. Αναλυτικότερα, σε κατακόρυφη θέση ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας ήταν σχεδόν διπλάσιος σε σχέση με την οριζόντια.
- Επιπρόσθετα, η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας του αγωγού θερμότητας προκαλούσε αντίστοιχη κι ομόρροπη μεταβολή στον ρυθμό απαγωγής θερμότητα στο σύστημα, όχι όμως σε τόσο έντονο βαθμό όσο η αλλαγή στον προσανατολισμό της διάταξης.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πολλά είναι ακόμα τα φαινόμενα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα πειραματικής έρευνας πάνω στον συγκεκριμένο τομέα της λειτουργίας του πυρήνα και των *heat pipes*. Έχοντας ως βάση τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη και με το κατάλληλο γνωστικό υπόβαθρο, θα μπορούσαν να αναλυθούν τα εξής:

- Η μελέτη της απόκρισης του συστήματος αλλά με έξοδο αυτή τη φορά μεγέθη υπολογισμένα στη πλευρά των πτερυγίων ψύξης του συμπυκνωτή του *heat pipe* (πχ. Θερμοκρασία & ταχύτητα αέρα).



- Η χρήση προσανατολισμού ενδιάμεσων θέσεων του αγωγού θερμότητας μεταξύ της κατακόρυφης και της οριζόντιας στις οποίες το διάλυμα της βαρύτητας θα προκαλεί διαφορετική επίδραση στην απόδοση του *heat pipe* για κάθε γωνία.
- Αναφορικά με την προηγούμενη πρόταση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη της συμπεριφοράς του όλου μοντέλου προσομοίωσης σε προσανατολισμούς με τον εξαερωτήρα του *heat pipe* σε υψηλότερη θέση από τον συμπυκνωτή (περιστροφή κατά  $180^\circ$  από την κάθετη θέση που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία). Σε μία τέτοια θέση, η βαρύτητα θα επιδρούσε αντίθετα στη κίνηση της υγρής φάσης και τότε η απόδοση του αγωγού θερμότητας θα μειωνόταν δραματικά.

## Βιβλιογραφία

- [1] *Jason D. Carr, “An Examination of CPU Cooling Technologies”, Thermal Management Options for Engineers, DSI, pp1-2*
- [2] *Δρ. Ρούσσος Παπαγιαννάκης Επίκουρος Καθηγητής (2010), Σημειώσεις από το μάθημα Μεταφορά Θερμότητας της Σχολής Ικάρων*
- [3] *Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine (2006), “Fundamentals of heat and Mass Transfer”, Sixth edition, John Wiley & Sons*
- [4] *Peter H.Sydenham, Richard Thorn (2005), “HANDBOOK OF Measuring System DESIGN”, Wiley*
- [5] *Δρ. Κωνσταντίνος Η. Κυρίτσης Λέκτορας (2010), Σημειώσεις από το μάθημα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Ικάρων*
- [6] *<https://www.quora.com/Do-we-actually-use-Laplace-Transforms-in-real-life>, Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018*
- [7] *Measurement Lab (2006), “First-Order System: Transient Response of a Thermocouple to a Step Temperature Change”*
- [8] *Thomas G. Beckwith, Roy D. Marangoni, John H. Lienhard V (2011), “Mechanical Measurements”, sixth edition, USA, Pearson Learning Solutions*
- [9] *[https://en.wikipedia.org/wiki/Time\\_constant](https://en.wikipedia.org/wiki/Time_constant), Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018*
- [10] *Edmundo Corona, (1999), “Dynamic Response of Measurement Systems”, Measurements Laboratory*
- [11] *<http://eleceng.dit.ie/gavin/Instrument/Dynamic/Dynamic%20Notes.html>, Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018*
- [12] *[https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_pipe](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pipe), Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018*



- [13] <https://www.thermacore.com/thermal-basics/heat-pipe-technology.aspx>,  
Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [14] <https://www.notebookcheck.net/Review-Core-Duo-vs-Core-2-Duo.2404.0.html>,  
Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [15] <https://www.myheatsinks.com/heat-pipe-solutions/standard-heat-pipes/>,  
Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [16] [http://www.adeo-heatpipe.com/design\\_guide,632,469.html](http://www.adeo-heatpipe.com/design_guide,632,469.html),  
Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [17] *D.A. Reay, P.A. Kew, R.J. McGlen (2014), "Heat Pipes Theory, Design and Applications", Sixth Edition, Elsevier*
- [18] <http://www.amsenergy.com/heat-pipe-technology-history/>, Τελευταία πρόσβαση  
στις 26/2/2018
- [19] <https://patents.google.com/patent/US3152774A/en>, Τελευταία πρόσβαση  
στις 26/2/2018
- [20] <https://patents.google.com/patent/US3229759A/en>, Τελευταία πρόσβαση  
στις 26/2/2018
- [21] <https://www.google.com/patents/US3613773>, Τελευταία πρόσβαση στις  
26/2/2018
- [22] <https://www.l-act.com/resources/heat-pipe-fundamentals/heat-pipe-gallery/>,  
Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [23] [http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Nonconventional\\_Heat\\_Pipes](http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Nonconventional_Heat_Pipes), Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [24] <https://www.androidauthority.com/fujitsu-lmm-loop-heat-pipe-cooling-594661/>, Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018
- [25] *Patrik Nemec, Alexander Caja, Milan Malcho (2013), "Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe", Elsevier*



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

- [26] *Mohamed H.A. Elnaggar, Ezzaldeen Edwan (2016), “Heat Pipes for Computer Cooling Applications”, S M Sohel Murshed*
- [27] *Μακρίδης Στυλιανός (2017), “ Θερμοκρασιακό πεδίο Heat Pipe σε μεταβατικές και μόνιμες συνθήκες λειτουργίας”*